



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Simulació computacional del naufragi d'una embarcació del S. XVII en aigües del T.M de Sitges

Treball realitzat per:

David Brun Tarragó

Dirigit per:

Ignacio Valero López

Grau en:

Enginyeria de la Construcció

Barcelona, 24 de Gener del 2018

Departament d'Enginyeria de la Construcció

TREBALL FINAL DE GRAU

AGRADECIMIENTOS

Expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que han prestado su ayuda e interés, especialmente:

A mi tutor, Ignacio Valero por su interés y compromiso a la hora de guiarme en toda la elaboración de esta tesina, aportando sugerencias e ideas que han ayudado a motivarme y a involucrarme con este proyecto.

A Pablo y Pavel por su ayuda y tiempo en enseñarme a utilizar el software necesario para las simulaciones y solucionar los problemas que han ido surgiendo.

A Itziar González por su interés en prestarme ayuda y sobre todo por dar un punto de vista distinto que ayudo a motivarme en un momento de estancamiento.

A mis amigos, con los que se compartir buenos y sobretodo malos momentos ayuda a tirar adelante no solo un proyecto si no cualquier objetivo en la vida.

A mi familia, siempre presente mostrando su interés y total colaboración dando ánimos en todo momento.

A mis padres y hermano que han estado siempre interesándose por este proyecto y prestando toda la ayuda que fuera necesaria.

Barcelona, a 24 de enero de 2018

David Brun Tarragó

Palabras clave: Brulote, Sitges, pecio, brea, métodos numéricos, simulación, CIMNE

En abril del año 2015, un equipo de arqueólogos de Sitges, encuentran sumergidos los restos de lo que parece ser un antiguo brulote implicado en la Batalla de Barcelona de 1642. Los brulotes eran navíos cargados con materiales explosivos que se lanzaban contra otras embarcaciones con el propósito de incendiarlas. Los restos encontrados en el fondo marino corresponden a una brea de origen vegetal, un material con una viscosidad muy elevada. Es de especial interés aportar información de ese acontecimiento, ya que en esa batalla se hundieron galeones considerados un auténtico tesoro arqueológico.

Esta tesina pretende estudiar el hallazgo, y mediante la utilización de métodos numéricos, se realizarán una serie de simulaciones que tienen como objetivo aportar información acerca del pecio, pudiendo confirmar o desmentir las primeras suposiciones realizadas por los arqueólogos.

Las simulaciones se han llevado a cabo con la colaboración de CIMNE, centro especializado en la investigación de métodos numéricos, que ha aportado el software necesario y el script para poder estudiar el comportamiento de la supuesta brea bajo distintas condiciones.

Finalmente, y como producto de todo el desarrollo de esta tesina también se ha llegado a plantear un método para encontrar pecios enfocando el problema de forma inversa.

ABSTRACT

Keywords: fireship, Sitges, wreck, pitch, numerical methods, simulation, CIMNE

In April 2015, a team of archaeologists from Sitges, find submerged the remains of what appears to be a fireship involved in the Battle of Barcelona in 1642. The ships were loaded with explosive materials that were launched against other boats with the purpose of setting them on fire. The remains found on the seabed correspond to a pitch of vegetable origin, a material with a very high viscosity. It is of special interest to provide information of that event, since in that battle sailed galleons considered an authentic archaeological treasure.

This dissertation aims to study the finding, and through the use of numerical methods, a series of simulations will be carried out that aim to provide information about the wreck, being able to confirm or disprove the first assumptions made by archaeologists.

The simulations have been carried out with the collaboration of CIMNE, a center specializing in the investigation of numerical methods, which has provided the necessary software and the script to study the behavior of the alleged pitch under different conditions.

Finally, and as a result of all the development of this thesis, a method to find wrecks has also been proposed, focusing the problem in an inverse way.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
Resumen	iii
Abstract.....	iv
Tabla de ilustraciones	vii
Listado de Tablas.....	viii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	11
Motivación de la tesina	11
Objetivos de la tesina	12
ESTRUCTURA DE LA TESINA	13
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE	15
Entorno / análisis contexto actual	15
Tareas realizadas	18
Análisis del hallazgo	20
Brulots.....	23
Contexto histórico	26
CAPÍTULO 3: DEFINICIÓN DEL MODELO	31
Propuesta simulación computacional.....	31
Definición del modelo	32
Restricciones del sistema → Límites de estudio	32
Variables que interactúan y sus interrelaciones	33
Medidas de efectividad para definir y estudiar el sistema	36
Resultados que se esperan obtener.....	37
CAPÍTULO 4: FORMULACIÓN DEL MODELO	39
Variables y sus relaciones.....	39

CAPÍTULO 5: SIMULACIÓN	45
Metodología y diagramas de trabajo.....	45
Descripción de los programas utilizados	46
Metodología	48
Geometría del problema.....	49
Análisis Resultados.....	55
Validación → “Valoración del método”	59
CAPÍTULO 6: PLANTEAMIENTO PARA LA LOCALIZACIÓN DE PECIOS.....	61
Introducción	61
Planteamiento de búsqueda de pecios.....	61
Desarrollo de la propuesta	62
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES	63
Conclusiones	63
Futuras líneas de investigación	64
CAPÍTULO 8: REFERENCIAS	65

TABLA DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Situación de Sitges	15
Figura 2: Localización Brulote de Marsay	16
Figura 3: Localización de otros Brulotes.....	17
Figura 4: Masa de brea. Fuente: Bruno Pares.....	19
Figura 5: Vista en planta (natural)	20
Figura 6: Vista en planta (modelizado 3D)	20
Figura 7: Detalle listón de madera.....	21
Figura 8: Guisa	22
Figura 9: Exterior del museo	23
Figura 10: Navío <i>Vasa</i>	23
Figura 11: Primeros brulotes	23
Figura 12: Interior de brulot	24
Figura 13: Guerra de los 30 años. Protestante (verde), católicos (naranja.).....	26
Figura 14: Corpus de sangre.....	27
Figura 15: Recorrido de la armada española	28
Figura 16: Zona de estudio	33
Figura 17: Relación Viscosidad - Temperatura.....	40
Figura 18: Geometría A. Lamina de brea	42
Figura 19: Geometría B. Esfera.....	42
Figura 20: Geometría C. Cilindro.....	43
Figura 21: Geometría D. Cónica.....	43
Figura 22: Diagrama de flujo - Metodología.....	45
Figura 23: Interfaz	50
Figura 24: Esquema brea	51
Figura 25: Contorno - Suelo	51

Figura 26: Geometría A..... 52

Figura 27: Comparativa teledetección..... 62

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Variables..... 35

Tabla 2: Viscosidad - Temperatura. 40

Tabla 3: Datos de viscosidad..... 41

Tabla 4: Ensayos..... 48

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

MOTIVACIÓN DE LA TESINA

En ocasiones el estudio in situ de un hallazgo arqueológico conlleva cierta dificultad o tiene un coste que no se puede asumir. En este caso el objeto de estudio está sumergido a poca profundidad y difícilmente se dan las condiciones óptimas para su prospección.

Otro aspecto importante es la escasa información extraída hasta el momento, este hecho, incentiva la utilización de técnicas alternativas para dar respuesta a incógnitas, que de otro modo no se podrían contestar.

En la búsqueda de técnicas alternativas para avanzar en el estudio, es donde, el Sr. Pere Izquierdo, responsable del Consorcio del Patrimonio de Sitges y arqueólogo submarino, se puso en contacto con CIMNE para informar del descubrimiento y poner a la disposición del centro la información necesaria para que se pudiera realizar un proyecto para hallar información adicional al hallazgo. CIMNE decide publicar la propuesta, para que se pueda realizar como trabajo de final de grado.

Esta tesina viene motivada por el objetivo de intentar dar una solución a un problema real, mediante el uso de métodos numéricos y simulación computacional.

La recopilación de bibliografía y el estudio de un episodio histórico, que puede encaminar a descubrimientos mayores, tiene especial interés, ya que puede suponer para Sitges una fuente de interés cultural muy importante.

La utilización del software necesario para realizar dicha simulación y la formulación de hipótesis constituyen otro reto para el estudiante.

Otro factor que estimula a la realización de este proyecto de investigación, es la posibilidad de obtener un método / programa que permita la búsqueda de pecios mediante la utilización de las técnicas nombradas anteriormente.

OBJETIVOS DE LA TESINA

El objetivo principal de esta tesina es aportar información acerca de un hallazgo que según una primera hipótesis parece ser el brulote de Marsay, involucrado en la batalla de Barcelona de 1642.

Inicialmente, el propósito era revertir el hundimiento mediante simulación computacional, analizar los resultados y dar respuesta a las posibles incógnitas planteadas inicialmente. Esta opción se descartó rápidamente debido a la complejidad del problema, ya que se aleja notoriamente de los estudios cursados por el estudiante.

La dificultad a un problema complejo, no permite llevar a cabo la primera hipótesis, de todas formas, el objetivo principal no ha cambiado. Uno de los objetivos más importantes será simplificar el problema inicial para poder adaptarlo a un ámbito académico. No obstante, se estudiarán que variables e hipótesis se tendrían que tener en cuenta en futuros trabajos.

De esta manera, esta tesina aportara la información necesaria o los parámetros que harían falta para realizar una simulación computacional, sin tener en cuenta el grado de dificultad.

Por otro lado, se realizarán un conjunto de simulaciones simplificadas para cumplir los siguientes ítems:

- Recrear el comportamiento de la brea bajo distintos parámetros.
- Verificar que el hallazgo concuerda con la hipótesis del Brulote de Marsay.
- Aportar datos adicionales y plantear nuevas hipótesis acerca del hallazgo.

Finalmente, se espera conseguir un método de trabajo para futuras investigaciones.

ESTRUCTURA DE LA TESINA

El documento se divide en 8 capítulos, resumidos a continuación:

- | | |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Capítulo 1 | Introducción. Se presentan los objetivos y las motivaciones por las cuales se ha realizado esta tesina. |
| Capítulo 2 | Estado del Arte. Se narra la situación actual del trabajo y se complementa con información acerca de los elementos involucrados en el proyecto. También se relata el contexto histórico relacionado con el naufragio. |
| Capítulo 3 | Definición del modelo. Se detalla de forma teórica cómo se realizara el estudio y se introduce la propuesta de la utilización de métodos numéricos para resolver las hipótesis planteadas. |
| Capítulo 4 | Formulación del modelo. Descripción del modelo que se utilizará y de los parámetros escogidos para poder simplificar el problema. |
| Capítulo 5 | Simulación. Se detalla todo el proceso que se ha seguido para realizar la simulación numérica y se exponen los resultados obtenidos. |
| Capítulo 6 | Planteamiento para la localización de pecios. Se plantea una estrategia de búsqueda de pecios, mediante la búsqueda inicial de “hallazgos” similares al de Sitges. |
| Capítulo 7 | Conclusiones. Se exponen las conclusiones que se han derivado de las simulaciones realizadas. |
| Capítulo 8 | Referencias. Se citan las referencias bibliográficas que se han utilizado en este trabajo. |

Capítulo 1: Introducción

CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

ENTORNO / ANÁLISIS CONTEXTO ACTUAL

En esta primera parte de la tesina se detallará el entorno del objeto de estudio y se analizará en qué contexto actual está envuelto el descubrimiento.

Para ello, se recopilará información de Sitges y se detallarán cronológicamente las diferentes tareas que se han llevado a cabo hasta la actualidad, relacionadas con el descubrimiento del Brulote de Marsay.

Finalmente, se valorará la importancia del descubrimiento y se explicará con más detalle que eran los Brulotes.

La situación actual se compone de distintos factores:

- I. Localización y estado actual del yacimiento
- II. Arqueológico / Histórico
- III. Sociocultural
- IV. Económico

Localización y estado actual del yacimiento

El hallazgo se encuentra situado en el fondo marino de Sitges (Figura 1), un municipio costero perteneciente a la provincia de Barcelona, concretamente en la comarca del Garraf. Se sitúa a unos 40 Km al sur aproximadamente de la capital catalana.



Figura 1: Situación de Sitges

El término municipal cuenta con más de 16 km de costa de los cuales una mitad son acantilados y la otra mitad pertenecen a playas. Es precisamente en estas costas donde se localiza la masa de brea.

El fondo marino de Sitges se caracteriza por estar formado por arena muy fina y en suspensión, este hecho dificulta la visibilidad a la hora de trabajar en la zona.

Capítulo 2: Estado del arte

El yacimiento se encuentra a unos 80 metros de la playa del “Estañol” (Figura 2) y a una profundidad de 2 metros. Está señalado con un muerto para facilitar la localización en futuras prospecciones [1].

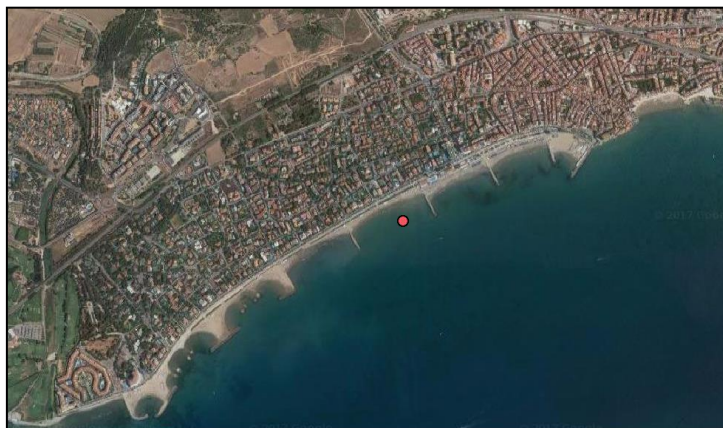


Figura 2: Localización Brulote de Marsay

Es un yacimiento muy difícil de expoliar debido a la solidez de la brea y poco interés económico que puede motivar a los furtivos.

El único aspecto que hay que tener en cuenta para su protección, es informar correctamente de su localización a las dragas, que periódicamente se utilizan en estas costas para regenerar las playas de arena, de cara a la temporada de verano.

Arqueológico / Histórico

En cuanto al aspecto arqueológico este hallazgo tiene varios puntos que lo convierten en un descubrimiento de una relevancia importante:

Según palabras del Sr. Pere Izquierdo, técnico especialista en patrimonio del Consorcio del Patrimonio de Sitges, en el mundo hay aproximadamente 160.000 barcos hundidos. La singularidad de este hallazgo reside en que en la actualidad únicamente se conoce la posición de dos brulotes más. En estos dos casos la documentación perteneciente a los navíos no está tan acotada y detallada como en el hallazgo de Sitges. Hay que destacar que el Brulote de Marsay es aproximadamente 50 años anterior a los otros dos y destaca por ser el único brulote hallado en el Mediterráneo. Este hecho pone en manifiesto la importancia de este hallazgo, no solo por ser el más antiguo, sino por las consecuencias que pueden suceder a este descubrimiento. Especialmente si se descubren los otros buques involucrados en la batalla de 1642.

Los otros dos brulotes encontrados se sitúan en:

- Islas Scilly: Archipiélago Británico ubicado a 50 km de la península de Cornualles en el sud de Reino Unido, rodeado por el Mar Céltico.
- Saint-Malô: Ciudad de la región de Bretaña, situada al Nord-Oeste de Francia, limítrofe con el canal de la Mancha.

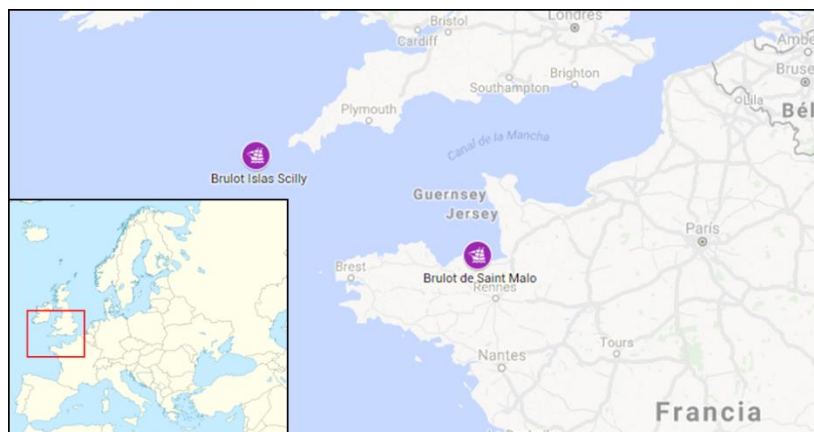


Figura 3: Localización de otros Brulotes

Sociocultural

La población de Sitges es conocida por su amplia oferta cultural, entre las que destacan el patrimonio artístico y arquitectónico del siglo XX. Hay que destacar sitios como el paseo marítimo, el Palau de Maricel y la Parroquia de Sant Bartomeu y Santa Tecla.

Sus playas también son visitadas cada año por un gran número de turistas que quieren disfrutar de sus calas y vistas panorámicas. Cuenta con una amplia oferta hotelera y multitud de locales nocturnos, especialmente conocidos por el colectivo LGTBI.

También es el centro del “Festival Internacional de Cinema de Catalunya”, reconocido a nivel europeo y vanguardia en cine fantástico y de terror.

Del mismo modo, el carnaval de Sitges es ampliamente conocido y atrae a miles de personas con ganas de diversión y fiesta.

En cuanto a muros, destacan el Muro de Maricel, el Museo Romano de Can Llopis y el museo biográfico de Cau Ferrat. La entidad que se ocupa de gestionar estos museos, conjuntamente con el Palau de Maricel, es el “Consorci del Patrimoni de Sitges”.

Se observa que no hay ningún museo específicamente relacionado con los acontecimientos históricos que esta tesina estudia. De esta forma, estos hallazgos pueden propiciar la oportunidad a Sitges de ampliar su oferta cultural.

Capítulo 2: Estado del arte

Económico

En el aspecto económico las principales aportaciones provienen de subvenciones de la Generalitat de Catalunya y del Consorcio del Patrimonio de Sitges. No obstante, la gran mayor parte de actuaciones y trabajos realizados son posibles gracias a la colaboración de voluntarios y entidades como clubs náuticos de Garraf, Sitges, club de Mar y el “Port d’Aiguadolç”.

TAREAS REALIZADAS

En el siguiente apartado se detallarán cronológicamente las diferentes tareas que se han llevado a cabo relacionadas con el descubrimiento del Brulote de Marsay y con la Batalla de Barcelona de 1642. [1]

Año 1962

Los primeros indicios acerca de la Batalla de Barcelona de 1642 que se encontraron fueron en 1962, en abril de ese año se halló una gran cantidad de monedas debido a un temporal y a la modificación del suelo marino como consecuencia de la construcción de nuevos espigones.

Año 1983

Se destaca este año por la creación de la “Carta arqueológica subacuática del Baix Llobregat y del Garraf”, un documento donde se reúnen todos los datos relacionados con los yacimientos de estas comarcas. Importante hecho para promover o crear interés por parte de la administración, ausente en algunos periodos, para que comprenda la importancia de preservar e investigar el patrimonio.

Año 2015

Hasta la fecha no se subraya ningún acontecimiento importante. Prospecciones esporádicas sin ningún resultado relevante.

Transcurridos 32 años de la creación de la carta arqueológica, con el fin de actualizarla, se efectúan tareas de revisión y verificación. Estas tareas se dividen en varias fases durante el año 2015, especificadas a continuación:

FASE I → [20-25 de abril]

En la primera fase de la campaña 2015 se actuó en las zonas más próximas al litoral, para evitar hacerlo en plena temporada de bañistas. En esta etapa se localiza, a unos 80 metros de la costa y a una profundidad de 2 metros, una masa de brea (Figura 4) en estado sólido que ocupa una superficie aproximada de 25 m² y cuenta con un volumen de 1,8 m³. Enganchado al alquitrán se encontró una barra metálica de 1,4 m de largo y

10 cm de ancho y un clavo. Este hallazgo concuerda con la suposición de que se traten de los restos del Brulote de Marsay, hundido en la Batalla de Barcelona de 1642.

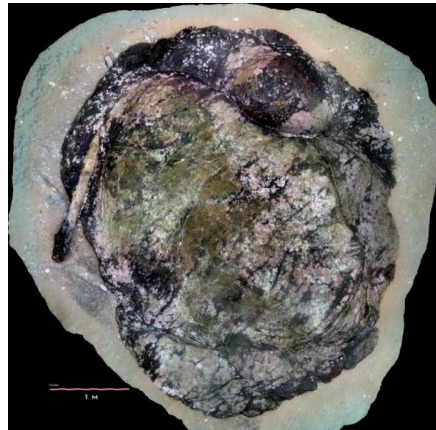


Figura 4: Masa de brea. Fuente: Bruno Pares

FASE II → [mayo - junio]

Se llevan a cabo inmersiones eventuales, con el fin de revisar el estado del yacimiento, en esta ocasión, se incluye la ayuda de una draga para observar la cantidad de arena que se ha depositado desde su descubrimiento y paralelamente se acuerdan directrices a tener en cuenta en la campaña de movimiento de tierras y regeneración de playas para la temporada de verano con el fin de evitar malmeter el yacimiento.

FASE III → [septiembre]

En esta fase, desarrollada durante la primera mitad del mes, se basó en la exploración con equipos magnéticos, conducidos por el especialista francés André Lorin. Estas técnicas de exploración permiten detectar elementos metálicos. La finalidad de esta prospección era encontrar indicios o señales de los posibles navíos implicados en la batalla de Barcelona, conocidos como “el Guisa”, “Mare de Déu de la Victoria”, “La Madalena”

Año 2016

FASE I → [abril-mayo]

El objetivo de esta fase era excavar una serie de zanjas para poder hacer una exploración más detallada del entorno de la masa de brea y averiguar si quedaban elementos que aún no se hubieran descubierto anteriormente. Desafortunadamente se había producido una acumulación de arena de considerable grosor al cual se unió un mal estado de la mar y pésima visibilidad. Ante estos hechos no se pudieron realizar las tareas planeadas.

Año 2017

FASE II → [junio]

Se amplió el área de prospección magnética en sentido Este i Oeste. También se realizó una magnetometría de flujo a la parcela denominada “Sitges I” con el propósito de detallar de forma más exhaustiva los puntos referenciados en anteriores prospecciones.

ANÁLISIS DEL HALLAZGO

A continuación, se detallarán las características del pecio encontrado y se comentarán las singularidades que presenta. Este análisis se tendrá en cuenta en la simulación y se comparará con los resultados obtenidos para descartar o verificar las hipótesis planteadas.

Las características del pecio se detallan a continuación, son valores aproximados ya que se desconoce la morfología en el manto marino y se ha supuesto que reposa en un plano.

Dimensiones	Superficie	Altura	Volumen
5x5 metros	25 m ²	Variable - En su máxima cota alcanza los 35 cm	1,8 m ³

En las siguientes imágenes se representa la vista en planta del hallazgo. Se observa una vista en planta natural (Figura 5), y la misma vista en planta que resulta de la modelización en 3D (Figura 6) realizada por Bruno Parés, autor de las mismas.

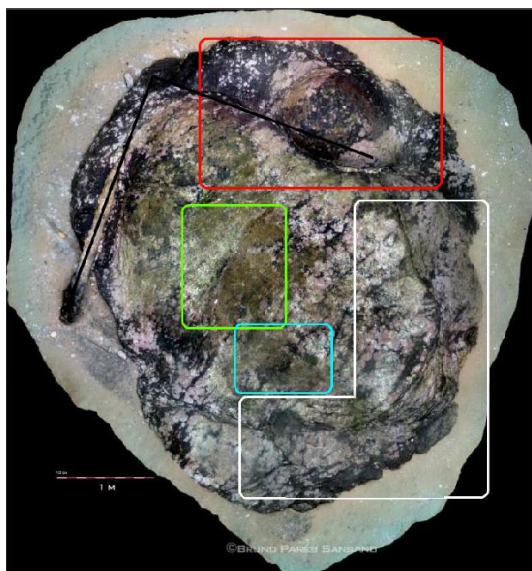


Figura 5: Vista en planta (natural)

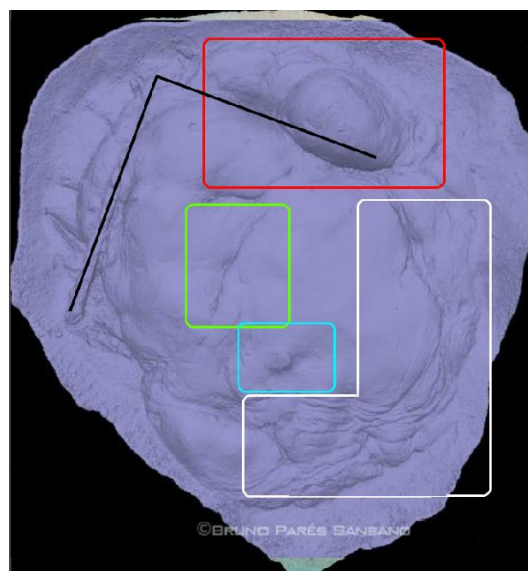


Figura 6: Vista en planta (modelizado 3D)

En las dos imágenes se han marcado un total de 4 zonas en distinto color y se ha trazado un ángulo recto en negro.

Zona verde: Situada aproximadamente en el centro y en la parte superior, se observa una arruga que forma una ligera depresión y es paralela al listón de madera.

Zona azul: Protuberancia de tamaño pequeño y en forma de circunferencia - elipse.

Zona blanca: Localizada en el perímetro y va desde la base del suelo hasta la parte más superficial. Se visualizan arrugas o acumulaciones laminares muy probablemente originadas por el acumulamiento progresivo de material. Pueden indicar la dirección en la que fluía el líquido aún caliente. Se pueden comparar visualmente con la lava de un volcán cuando se desplaza por una pendiente.

Zona roja: Elemento muy singular, separado claramente del cuerpo principal y con una forma difícilmente previsible. Se puede comparar con la protuberancia de la zona azul siendo esta mucho más voluminosa.

Zona negra: Se destaca el ángulo que forma el listón de madera, situado en la parte izquierda del ángulo y la separación entre el cuerpo principal y el montículo de la zona roja. Puede ser mera casualidad o que en esta franja reposara otro listón de madera del brulote. La localización o información que se pueda extraer del listón, aportara detalles importantes en cuanto al tamaño original del navío. Este hecho es especialmente importante para mejorar las hipótesis e ir acotando el estudio.

Otro detalle a destacar se observa en la siguiente imagen (Figura 7):



Figura 7: Detalle listón de madera

El listón de madera descansa sobre un manto de brea que ha sido aplastado claramente, es muy probable que la viscosidad en ese instante fuera baja ya que el listón está bastante incrustado y dejó un corte que se observa fácilmente en el resto del volumen de brea.

Importancia del descubrimiento

En el apartado anterior, se ha narrado de forma objetiva la situación presente del hallazgo. Para analizar el presente es primordial conocer el pasado, este permite formular hipótesis más acotadas y precisas.

Capítulo 2: Estado del arte

No obstante, y a modo de motivación para el lector y el autor de este trabajo, en las siguientes líneas se tratará de entender la importancia que tuvo descubrir los restos de un brulote implicado directamente en la Batalla de Barcelona de 1642.

La necesidad de este apartado es debido a que en ocasiones entender la magnitud de ciertos descubrimientos puede resultar difícil, ya sea por falta de conocimientos, desinterés por la rama en la que se efectúa el hallazgo o simplemente por no conocer las consecuencias en las que pueden derivar.

Como se ha comentado en anteriores apartados, hay documentación acerca de miles de navíos hundidos en el Mediterráneo, pero el caso del Brulote de Marsay es el primero en este tipo de embarcaciones. En este aspecto ya se puede ver que se trata de un hallazgo significativo ya que su estudio servirá para conocer mejor esta tipología de embarcaciones y aclarar los detalles entorno a los últimos instantes a su hundimiento ya que hay que recordar que dependiendo de las fuentes que se consulten hay variaciones.

De todos modos, este descubrimiento ha despertado un gran interés en el mundo de la arqueología subacuática ya que puede ser el motivo por el cual se incentive la búsqueda de los otros barcos implicados en la batalla de 1642. Especialmente “El Guisa” (Figura 8) y “La Magdalena”, estos descubrimientos no solo serían bien recibidos por parte de los



Figura 8: Guisa

arqueólogos involucrados en la tarea de investigación, sino que según palabras del Sr Pere Izquierdo y Raül Martínez (arqueólogos subacuáticos) se estaría hablando de unos de los hallazgos más importantes a escala internacional [2]. Hay que entender que este tipo de barcos representaban todos los avances tecnológicos de la época, en la misma línea también llevarían consigo objetos representativos, herramientas, vestimentas y otros objetos que serían de gran valor para engrandecer los conocimientos a todos los niveles que se tienen del siglo XVII.

Se constata que a nivel arqueológico el descubrimiento sería de gran importancia, pero hay otro factor que también merece ser destacado, el factor social y turístico. El descubrimiento podría iniciar un proyecto para hacer de Sitges un destino turístico dirigido al patrimonio subacuático.

Para comprender el impacto que supone un descubrimiento de este calado, en las siguientes líneas se presentará el Museo Vasa, fundado como resultado del hallazgo de un navío de características similares a los dos mencionados anteriormente.



Figura 9: Exterior del museo



Figura 10: Navío Vasa

El museo Vasa (Figura 9) situado en la isla de Djurgården en Estocolmo es un museo marítimo que alberga en su interior al Vasa, un barco de guerra del siglo XVII del cual se conserva el 98% de su estructura original (Figura 10). El barco fue reconstruido y actualmente se siguen aplicando tareas de mantenimiento y restaurado. Es la atracción principal del museo que además cuenta con exposiciones de los objetos relacionados con el buque. Hay que destacar que en 2011 fue visitado por 1,2 millones de visitantes y que cuenta con el privilegio de ser el más visitado de Escandinavia [3].

Parece difícil imaginar un museo de esta envergadura en Sitges, pero si finalmente se localizan los navíos y se encuentran en buen estado podría significar un antes y un después para el municipio.

BRULOTS

Orígenes y evolución

Uno de los mayores miedos que puede albergar los marineros de todo navío, es la posibilidad de que se produzca un incendio en la embarcación. Un incendio a bordo puede significar la destrucción parcial o total del buque. Como es lógico pensar, este poder destructivo del fuego se ha utilizado en los conflictos navales desde el mismo momento en que los barcos se utilizaron en guerras. No obstante, es importante diferenciar el uso del fuego para dañar embarcaciones, con el uso específico de barcos destinados a ese fin (Figura 11). De esta forma las primeras referencias que se conocen entrono al uso de brulotes las encontramos en la edad Antigua donde Tucídides narra la existencia de un buque lleno de madera de pino que fue prendido y lanzado contra los atenienses en el 415 a.C aproximadamente. En la batalla de los acantilados rojos (208 d.C) se utilizó una nave con listones de madera, cañas secas y aceite.

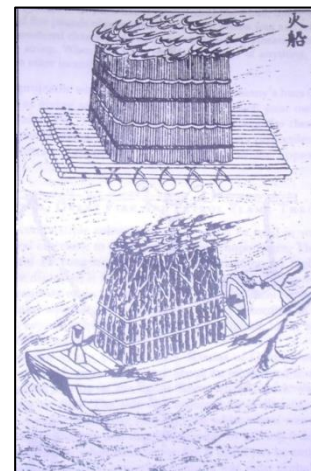


Figura 11: Primeros brulotes

Capítulo 2: Estado del arte

Sin embargo, la época dorada para estas embarcaciones no llegó hasta el siglo XVII donde su uso se extendió y pasó a formar parte en la estrategia de la gran mayoría de conflictos navales. Hay connotaciones de su uso en las batallas siguientes:

- Batalla de Getaria (1638)
- Batalla de Barcelona (1642)
- Batalla de Solebay (1672)
- Batalla de La Hogue (1692)

La guerra de independencia griega (1821-1832) es probablemente el último gran conflicto donde el uso de brulotes forma parte de la estrategia y es un acto premeditado. A partir de ese momento su uso fue decayendo debido a la transformación que causó la sustitución de la madera por hierro y las velas por motores a propulsión.

Características

Como se ha comentado anteriormente el objetivo de los brulotes era simple, dañar de forma significativa las embarcaciones enemigas mediante el uso de materiales inflamables o explosivos. En este apartado detallaremos como era la estructura interna de un brulote y como se construían.

Dimensiones y estructura:

Normalmente los brulotes se construían a partir de embarcaciones viejas o dañadas, donde lo único que se buscaba era la flotabilidad de la estructura para poder cargar el interior con materiales que se detallarán más adelante. De esta forma, a lo largo del período de su uso en guerras navales, encontramos una gran variedad de tamaños. Normalmente se usaban botes pequeños que proporcionaban una fácil maniobrabilidad, pero encontramos relatos en que también se usaron viejos galeones reconvertidos en una auténtica bomba náutica.

Carga:

Anteriormente se ha visto que por razones estratégicas el tamaño de los brulotes puede influir, consecuentemente también ocurre con el cargamento con el que se equipaban. En este apartado se comentarán los distintos elementos o materiales que se usaban para aprovisionar los buques, cada uno de ellos con un objetivo concreto, pero sin descuidar su meta principal.

En cuanto al material explosivo o inflamable se usaban barriles llenos de polvo de carbón, alquitrán, grasa animal y compuestos químicos como salitre, una mezcla de KNO_3 y NaNO_3 .



Figura 12: Interior de brulote

También se utilizaban balas de cañón (Figura 12), trozos de roca o materiales similares compactados en otros compartimentos de tal manera que con las explosiones salieran proyectados todos estos elementos a modo de metralla, de esta manera se aumentaba el radio de daño provocado.

Con los métodos descritos previamente el daño era instantáneo, no obstante, se utilizaban otros recursos para provocar explosiones retardadas, como la utilización de sustancias inflamables y que además eran muy adherentes dificultando la extinción por parte de los tripulantes del barco asediado.

Otro aspecto importante era el método de encendido del artefacto, encontramos diferentes métodos. En los brulotes se disponía de conductos que comunicaban toda la cámara explosiva para asegurar que en el momento de ignición se crease la mayor deflagración posible. Estos conductos podían ir acompañados de una mecha para retardar el tiempo. También se acostumbraba a recubrir el casco con una solución inflamable y resinosa para permitir que cualquier llama que tocara el barco permitiera engranar el mecanismo de combustión.

Tripulación:

Finalmente, se ha visto como se preparaban los brulotes, pero todos los pasos previos conducen a la maniobra de aproximación. Existen múltiples tácticas detalladas a continuación:

- Remolque: Los brulotes eran remolcados por galeras hasta que se ubicaban a una distancia prudencial del enemigo, en ese instante se remolcaban hacia el barco rival mediante botes, una vez se encontraban lo suficiente cerca se utilizaban arpones para anclar el brulote al barco, entonces se prendía el barco y los brulotiers regresaban con la tripulación. Esta táctica se empleaba mayoritariamente contra barcos anclados e incluso para destruir navíos amarrados en puertos durante la noche.
- Aproximación tripulada: Esta estrategia consistía en acercarse al enemigo utilizando el propio brulote, provisto de velas y timón, para acto seguido abandonarlo mediante botes. Sin duda es el método que conlleva más riesgo para los tripulantes, pero asegura dirigir con bastante fiabilidad el navío.
- Aproximación sin tripulación: Este método de acercamiento consistía en aprovechar las condiciones de viento y mar para lanzar el brulote esperando que siguiera una trayectoria esperada. Normalmente se usaba cuando el enemigo tenía viento en contra, también era usual lanzar varios brulotes alineados para abarcar mayores probabilidades de impacto.

Hay que destacar que las condiciones en un conflicto marítimo pueden ser muy adversas y especialmente impredecibles, por lo que la proporción de brulotes que lograban su cometido no siempre era la esperada, ya que se podían desviar, explotar antes de

Capítulo 2: Estado del arte

tiempo, o incluso en el peor de los casos, redirigirse hacia el propio bando que lo había lanzado.

CONTEXTO HISTÓRICO

En 1642 Europa está envuelta en la guerra de los 30 años, un conflicto que afectó gran parte de la Europa central durante la primera mitad del siglo XVII, concretamente desde el año 1618 hasta 1648. Inicialmente se inició en el Sacro Imperio Romano Germánico por motivos religiosos pero debido a los múltiples intereses territoriales de diferentes países como España, Francia, Suecia, Dinamarca...etc. El conflicto se acabó extendiendo por todo Europa, convirtiéndose en uno de los acontecimientos más relevantes de la Edad Moderna.

La exuberancia que manifestaba la iglesia católica juntamente con la corrupción económica y ausencia de valores morales en determinados momentos de su historia, provocaron el nacimiento del protestantismo, encabezado por Martín Lutero. A él se añadieron otros movimientos religiosos como los calvinistas, anglicanos y ortodoxos. Todas estas corrientes obedecían a una idea común: El rechazo al poder que ejercía la iglesia católica en el panorama político y los excesos de esta, comentados anteriormente. Por otro lado, la Paz de Augsburgo permitía a los príncipes adoptar libremente la religión en sus territorios, como es lógico este hecho enfrentó a católicos y a seguidores de los nuevos movimientos durante varios años.

Esta frágil situación originó la formación de varias organizaciones como la Liga Protestante que contaba con el apoyo de países como Francia e Inglaterra; por otro lado, los católicos crearon la Santa Liga Alemana para defender sus intereses, dividiendo Europa en 2 bandos (figura 13)



Figura 13: Guerra de los 30 años. Protestante (verde), católicos (naranja.)

En la última etapa de este conflicto, conocida como etapa francesa se desencadena en Cataluña la guerra de los segadores.

Debido al escenario donde se encuentra el Principado de Cataluña, Felipe IV, rey de España, decide posicionar tropas a lo largo de todo el territorio catalán para poder hacer frente al enemigo y defender sus intereses, la idea del rey tenía que someterse a las cortes catalanas, donde no fue bienvenida y fue rechazada de forma tajante. Sin embargo, en 1635, Luis XIII de Francia declara la guerra a España, como consecuencia inmediata Cataluña se ve obligada a participar en el enfrentamiento a pesar de no apoyar al rey castellano. Cumpliendo con la idea de la “Unión de Armas” se enviaron 40.000 hombres, 6.000 de los cuales fueron aportados por Cataluña. No solamente consistía en una aportación humana, también hubo contribuciones económicas y la obligación de hospedar a los soldados. Estas circunstancias y el abuso de poder por parte de los soldados, los cuales, perpetraban robos, violaciones y otros enfrentamientos con la población, derivaron en protestas que fueron duramente reprimidas. El malestar de los catalanes iba en aumento lo que desencadenó “El corpus de Sangre”.

El 7 de julio de 1640 aprovechando el festejo del “corpus christi” (Figura 14), un grupo numeroso de rebeldes entraron en Barcelona y empezaron a perseguir a funcionarios reales y castellanos

Debido a la dificultad de resolver el conflicto social, Felipe IV decide enviar tropas para controlar y acabar con una revuelta, que debilitaba su capacidad bélica contra Francia, considerado el verdadero enemigo.



Figura 14: Corpus de sangre

Ante el firme avance del ejército castellano, la Generalitat de Cataluña, dirigida por Pau Claris, declara la Republica Catalana para poder establecer un pacto político-militar con Francia que ayudase a escudarse de la invasión castellana. Dando sus frutos en importantes victorias como en la batalla de Montjuic (enero 1641),

Al siguiente año, hubo un conjunto de tropas castellanas que se quedaron atrapadas en Rosas sin tener la opción de regresar, ya que tropas francesas estaban atracadas en el puerto de Barcelona.

Es en este hecho histórico donde tiene lugar la batalla de Barcelona, donde se ve involucrado el navío estudiado en esta tesina.

Esta situación originó una campaña, por parte de la armada española, para recuperar las tropas.

Capítulo 2: Estado del arte

La escuadra española, comandada por el duque de Ciudad Real, empezó su expedición desde la bahía de Cádiz el 18 de mayo. La flota la formaban los siguientes navíos:

- 2 galeones, uno de 66 cañones y otro de 60
- 2 fragatas
- 31 Urcas para transporte de tropas
- 3 Pataches
- 6 Tartanas
- 6 brulotes
- 35 buques *longos*

Una vez cruzaron el estrecho, entrando en el Mediterráneo, la flota se cruzó con tres naves ajenas, que fueron atacadas y capturadas después de una noche de intercambio de fuego.

La primera parada fue en Málaga, donde se añadieron más hombres a la tripulación y otros utensilios.

La siguiente parada en Cartagena, añadió ocho galeras a la expedición. A pocos kilómetros, en Alicante, se repostó pólvora y dos galeras más pasaron a formar parte de un escuadrón cada vez mayor. También se repararon seis fragatas.

Tras terminar en Alicante, las galeras zarparon hacia Tarragona, llegando el día 22 de junio. Un millar de hombres de infantería subieron a bordo, el resto de las unidades atracaron en Vinaroz a realizar tareas de mantenimiento y suministro.

Por otro lado, el ejército francés al mando del marqués de Brézé tenía en su poder un mayor número de navíos, concretamente:

- 44 navíos de guerra
- 14 brulotes
- 17 galeras

En la siguiente figura se observa el recorrido, descrito anteriormente.



Figura 15: Recorrido de la armada española

A continuación, se detallará el enfrentamiento conocido como Batalla de Barcelona. Se prestará especial atención a datos como la dirección e intensidad del viento, posición de las embarcaciones y número de navíos hundidos. De esta forma se empezará a fundar una primera hipótesis con estos datos de partida.

Primer día (30 de junio)

La flota española llega a Barcelona con viento a favor, concretamente en la dirección sud-sudeste. Los franceses estaban fondeados y rápidamente buscaron posicionarse a favor del viento (Barlovento), dirigiéndose hacia Montjuic, manteniendo una distancia prudencial.

Alrededor de las 15:00 de la tarde, la galera española del duque de Ciudad Real se encontraba a “dos tiros de cañón” de la escuadra francesa. En ese instante se dio la orden de abrir fuego y dar la señal de abordar, que no surgió efecto ya que los franceses lograron esquivar la ofensiva.

Sobre las 16 de la tarde, empezó a oscurecer y la persecución continuaba y los intercambios de fuego eran constantes. Para facilitar la precisión, la armada española decidió recoger las velas, quedándose inmóviles, este instante el comandante francés aprovechó para acercarse. Formando parte de la estrategia del Duque, se lanzaron dos brulotes que fueron desviados a tiempo por los franceses y acabaron consumiéndose sin afectar a ningún navío.

Hubo un percance relacionado con el Santo Tomas de Aquino, galeón español, que se enredó con un brulote aliado.

La escuadra francesa huyó quedando a la popa de los españoles y a sotavento. Los españoles pasaron la noche reparando los daños sufridos durante el día. Y se encontraban a barlovento.

Segundo día (1 Julio)

Al amanecer del segundo día los dos batallones se encontraban justo donde el viento les había llevado, ya que para efectuar las tareas de reparación hay que aprovechar los vientos.

No fue hasta el mediodía que las dos flotas no se encontraban en disposición para retomar el enfrentamiento frente a las costas del Garraf.

Siguiendo la misma dinámica, el almirante español dio órdenes de abordar a los franceses, estos esquivaron la maniobra poniendo popas al viento. Después de persecuciones y esquivas, el viento se detuvo, momento para utilizar los cañones y empezar un canje de ráfagas. Pasado un tiempo, se levantó una ligera brisa en dirección opuesta a los españoles. Los franceses se encontraban en barlovento, momento en que aprovecharon para lanzar un brulote contra la nave insignia española.

Capítulo 2: Estado del arte

Según las fuentes que se consulten, esta nave de fuego se desvió producto del azar o fue desviada con pericia y habilidad española, sin poder evitarlo, impactó con El Guisa, provocando un gran incendio que afectó de forma colateral al galeón Magdalena.

Las consecuencias fueron devastadoras, centenares de hombres perdieron la vida y en cuanto a daños materiales se perdieron los galeones Guisa y Magdalena. [4]

CAPÍTULO 3: DEFINICIÓN DEL MODELO

PROPUESTA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

La aplicación de la física y la matemática en situaciones del mundo real introduce problemas que no pueden ser resueltos de forma analítica o con una exactitud tolerable. El problema que se planteará incluyendo la simplificación de variables, es complejo y extremadamente laborioso en cuanto a cálculo. La resolución analítica del problema es inviable.

Es por este motivo, que será necesario abordar el problema con el soporte de un procedimiento numérico, para encontrar una solución. Los programas que se utilizarán y todos los detalles acerca del software involucrado se detallarán en el capítulo 5.

Ventajas simulación

- Estudiar problemas complejos cuyo análisis analítico no es viable o requiere de una infraestructura no disponible.
- Identificación de puntos críticos en un sistema complejo.
- Realizar un estudio de alternativas con variaciones controladas, imposible de llevar a cabo en un entorno real.
- Cualquier problema puede ser modelizado
- La formulación del modelo se puede modificar o ampliar parcialmente para adaptarlo a otro problema de características similares, sin la necesidad de realizar otro modelo de nuevo.

DESVENTAJAS DE LA SIMULACION

- En ocasiones no se puede validar el modelo, en este caso las conclusiones son estimaciones de la realidad que en ningún caso se pueden tomar como tal.
- El desarrollo y la validación de modelos numéricos requieren una gran cantidad de recursos humanos y tecnológicos.
- La realización de un gran número de ensayos acarrea un mayor tiempo de computación y coste económico.

DEFINICIÓN DEL MODELO

En el siguiente apartado se centra en la búsqueda de una metodología, que permita iniciar posteriormente una simulación numérica. En otras palabras, en las siguientes páginas se analizará cómo hay que realizar dicho estudio y se pretende hallar que parámetros hay que tener en cuenta para realizar dicha simulación.

En primer lugar, se establecerán unos límites de estudio, que acotaran la zona y permitirá establecer unas condiciones de contorno.

Acto seguido se formulará una hipótesis histórica, contrastada con la documentación que se haya recopilado sobre los hechos. Este paso permitirá establecer las primeras preguntas y plantearse qué aspectos se tendrán cuenta a la hora de la parametrización.

Posteriormente, se analizarán las variables a tener en cuenta en el problema y se estudiarán los fenómenos que hayan influido en el yacimiento.

Finalmente, con toda la información que se haya recopilado, se escogerán las variables que puedan aportar respuestas al problema.

RESTRICCIONES DEL SISTEMA → LIMITES DE ESTUDIO

En una simulación computacional es importante delimitar el objeto de estudio y definir qué resultados o soluciones se esperan obtener. Es trascendental acotar estos elementos, ya que, si no se hace el estudio, se puede alargar indefinidamente debido a las distintas conclusiones que van apareciendo durante las simulaciones.

En este capítulo no solo se expondrá el límite explicado anteriormente, sino también se detallarán las restricciones y/o acotaciones a las que se someterá el estudio.

Los distintos límites que se presentaran son los siguientes:

Yacimiento:

El yacimiento se encuentra en un estado de conservación excepcional, puesto que la brea vegetal que lo compone, no es vulnerable al entorno marino ni corre el riesgo de ser expoliado.

Caracterización del material:

La obtención de probetas, con las dimensiones adecuadas, para poder hacer ensayos y extraer información mecánica y física de la brea no es posible debido al impacto que supondría arqueológicamente en el yacimiento. Las dimensiones optimas de la probeta cilíndrica son de 10 x 15 cm (diámetro x altura).

Zona geográfica:

La designación de la zona de estudio es el aspecto más relevante de este capítulo ya que la gran mayoría de parámetros que influyen en el análisis están directamente relacionados con las características de la zona escogida.

En el apartado anterior, donde se explican de forma detallada los acontecimientos históricos, el día del lanzamiento del brulote, los hechos ocurren en el sector de las costas del Garraf. Es por este motivo que la zona de estudio abarcara dicho sector.



Figura 16: Zona de estudio

VARIABLES QUE INTERACTÚAN Y SUS INTERRELACIONES

Una vez se ha definido el área de estudio, se procederá a listar las variables presentes en esta zona.

La designación de las variables, se hará separando en distintos instantes los hechos narrados en el apartado del contexto histórico.

- Estado 1: El brulote se encuentra en llamas, con total seguridad empotrado en El Guisa.
- Estado 2: Desplazamiento del lugar de impacto hasta zona del yacimiento.
- Estado 3: Transcurso de los años hasta la actualidad

A continuación, se detallarán cada uno de los estados, añadiendo que variables aparecen en cada uno de ellos.

Estado 1:

Nos encontramos en el instante inicial, donde el brulote ha colisionado con El Guisa. El navío completamente cargado de material explosivo e inflamable. Se producen explosiones que pueden provocar pérdida de volumen del material. Hay que tener en cuenta que tanto el brulote como el galeón francés, difícilmente pueden navegar y son conducidos por el viento y especialmente por la corriente marina y oleaje.

Capítulo 3: Definición del modelo

Estado 2:

En este estado el brulote se consume debido a las llamas mientras va navegando libremente. La brea se encuentra en estado líquido y la temperatura es muy elevada. Se puede observar que las variables predominantes son: la viscosidad del material, el gradiente de temperatura y la corriente marina que va estrechamente relacionada con el viento.

Hay que mencionar existen dos posibles hipótesis en este instante. Hay que determinar si el brulote embarranca en la orilla o si lo contrario se hunde antes de llegar a esta.

Este aspecto es de especial importancia, por lo tanto, el estado dos, se bifurca en:

Estado 2.1: (embarrancamiento)

Para que un navío quede encallado o embarranque, el calado de este, ha de ser igual o superior a la profundidad del mar. En este caso se podría hallar la batimetría de la época o hacer un estudio para determinarla y compararla con la profundidad del mar, de esta forma se podría establecer que calado tenía el brulote. Conociendo el calado se podría determinar las dimensiones del navío. Estas dimensiones no se especifican en la bibliografía referente al conflicto y sería un dato importante para conocer factores como la capacidad de carga, estructura, peso, material utilizado...

Estado 2.2: (hundimiento)

En esta segunda opción, el brulote se hunde por completo antes de llegar a la orilla. El material se deposita en el fondo marino, probablemente encerrado en la cámara de combustión. En este caso, sería importante conocer el tiempo medio que tardaría un navío con esas características en hundirse y comparar con las narraciones históricas para esclarecer si fue o no posible el hundimiento.

Estado 3:

Finalmente, el material se encuentra en el lecho marino, a medida que se va enfriando la viscosidad aumenta hasta prácticamente solidificarse en la forma actual. La temperatura del agua en este instante es fundamental, ya que es la que determinará cuanto tiempo tarda el material en solidificarse. Contra más tiempo tarde, más modificaciones actuarán sobre la brea ya que la viscosidad aun será lo suficientemente baja como para moldear el material.

	Estado 1	Estado 2.1	Estado 2.2	Estado 3
Viscosidad				x
Geometría				x
Batimetría		x		x
Corriente Marina / Oleaje	x	x	x	x
Viento		x	x	
Temperatura agua				x
Temperatura brea	x	x	x	x
Densidad	x	x	x	x

Tabla 1: Variables

Viscosidad

Definida como la facilidad de un fluido para deslizarse o fluir, esta variable propia de cada material se expresa en Pa·s y comprende valores que fluctúan desde 10^{-6} para los gases hasta 10^{11} en compuestos similares a la brea que se estudia en este trabajo.

Geometría

Hallar pistas de la geometría inicial del problema es uno de los principales objetivos de este estudio. Altamente relacionada con la viscosidad y es el parámetro más complejo de establecer ya que no hay fuentes que corroboren los últimos instantes del hipotético hundimiento.

Corriente Marina / Oleaje

Determinarán en gran medida la dispersión del material hasta llegar al fondo marino, los fragmentos que se vayan separando serán arrastrados por la corriente. También ejercen una fuerza continua que modificaran la forma progresivamente mientras la viscosidad del material lo permita y por otro lado el oleaje que, desplazará el material antes de que se hunda.

Viento

Conocer los datos de esta variable en el momento del hundimiento permitiría saber el origen aproximado o por lo menos la dirección inicial del navío o del material encontrado.

Batimetría

El entorno donde se deposita la brea, la pendiente y la profundidad son factores que modifican la geometría final a corto y medio plazo.

Temperatura agua

Parámetro que permitiría averiguar con qué rapidez se enfrió la brea en el momento en que contacta con el agua del mar. Sería necesario plantear un problema de intercambio de calor entre dos medios. A diferencia de otras variables, es un dato que se puede obtener fácilmente ya que en estos últimos siglos la temperatura del mar no ha variado significativamente hablando en términos absolutos.

Temperatura brea

Esta variable tiene una gran importancia de ella depende la viscosidad del material y por consiguiente la geometría con la que la brea se deforma a lo largo del tiempo.

Densidad

La densidad es de las variables más fáciles de obtener ya que con una muestra se puede determinar su valor. Este parámetro es importante especialmente en el problema termodinámico. Según su valor, la brea empleara un tiempo u otro en hundirse y hay que entender que el comportamiento de este material mientras se está hundiendo es difícil de predecir debido al oleaje y a la dispersión, como ya se ha comentado anteriormente. El tiempo que tarda en hundirse es fundamental ya que el enfriamiento afecta muy significativamente a la viscosidad. En las mismas condiciones una pequeña demora en el tiempo de hundimiento se traduce en una gran variabilidad en la geometría final.

Como se ha visto, todos los parámetros están relacionados entre sí, en mayor o menor medida. En otros capítulos se ha comentado la complejidad del problema planteado, y es por ese motivo que la simplificación de las variables juega un papel calve para poder adaptarlo a esta tesina.

MEDIDAS DE EFECTIVIDAD PARA DEFINIR Y ESTUDIAR EL SISTEMA

La designación de variables en el apartado anterior crea un panorama distinto para cada uno de los estados. Hay variables comunes en todo el proceso y otras que aparecen solamente en un estado.

Del mismo modo pasa con los tres estados definidos, pertenecen al mismo problema, pero cada uno de ellos tiene propiedades distintas a tener en cuenta. Es por este motivo que esta tesina se centrara en un único estado, concretamente el estado 3, y no se utilizaran todas las variables implicadas.

Esta decisión viene motivada por los siguientes aspectos:

- La dificultad que significaría implementar todas las variables en un código.
- Un gran número de hipótesis con distintas ramificaciones que aumentaría de manera exponencial el número de casos a estudiar.

RESULTADOS QUE SE ESPERAN OBTENER

Uno de los principales errores que se pueden cometer en una simulación, es dar por verídicos los resultados que se obtengan en dicho proceso. El hecho que el problema se resuelva computacionalmente no implica que la solución sea la esperada o la que concuerde con la realidad.

Por este motivo es necesario conocer y estudiar bien el problema a priori y acotar que soluciones son factibles y cuáles serán susceptibles a una revisión o descarte automático.

En este caso se espera obtener una geometría parecida a la actual ya que en los últimos siglos la morfología del material no ha experimentado grandes cambios.

También se espera ver que comportamiento presenta el material según la viscosidad inicial.

CAPÍTULO 4: FORMULACIÓN DEL MODELO

En el apartado anterior se han definido los diferentes estados del problema y se han definido las variables de cada uno de estos. En el presente capítulo se recopilará información de las variables que únicamente se harán servir para resolver el problema numérico.

VARIABLES Y SUS RELACIONES

Las variables que se utilizarán en la simulación son las siguientes:

1. Viscosidad
2. Geometría

VISCOSIDAD

La viscosidad juega un papel clave en la resolución del problema, como se ha comentado en el capítulo 3, no se dispone de los datos reales y sería fundamental para futuros estudios, hacer un ensayo con una muestra y determinar el valor real de este parámetro.

La importancia de hacer un ensayo recae en que la viscosidad es un parámetro, que en este tipo de materiales puede fluctuar considerablemente ya que según el tipo de brea que se trate, estaríamos hablando de que los valores fluctúan varios órdenes de magnitud. Este hecho induce a resultados distintos y por consiguiente con conclusiones muy dispersas.

Otro hecho a destacar es la dificultad de encontrar bibliografía al respecto con la que se ha encontrado el autor de esta tesina, el número de estudios sobre este material es escaso ya que principalmente la brea vegetal es un material que ha sido substituido por brea de origen industrial, derivada de la destilación industrial del alquitrán. No obstante, a continuación, se muestra una tabla con los distintos valores encontrados y sus fuentes.
[5]

Table IV					
Viscosity calculations from softening points and toluene-insoluble contents					
Material no.	Material type	Temperature, °C	Viscosity, cp		Ratio of calculated to measured value
			calculated	measured	
1	low insoluble road tar	5	9.2×10^5	1.04×10^7	0.09
		70	190	243	0.8
		130	5.5	10.9	0.5
2	high insoluble road tar	5	4.8×10^6	2.7×10^7	0.2
		65	300	627	0.5
		135	8.6	13.5	0.6
5	low viscosity pitch (straight-run)	35	1.3×10^8	8.1×10^7	1.6
		75	2.1×10^4	1.4×10^4	1.5
		150	32	27	1.2
17	hard pitch	90	2.7×10^6	4.0×10^6	0.7
		150	1.9×10^3	2.2×10^3	0.9
		199	130	154	0.8
		224	56	67	0.8

Tabla 2: Viscosidad - Temperatura.

Con los datos de la tabla anterior, se elaborará un gráfico y se obtendrá una expresión que permita relacionar la viscosidad con la temperatura. Para ello se graficarán los datos tanto de la brea de baja viscosidad “Low” y de la alta viscosidad “Hard”. En verde se representa el valor medio entre las dos breas y es el valor que se empleará en las simulaciones.

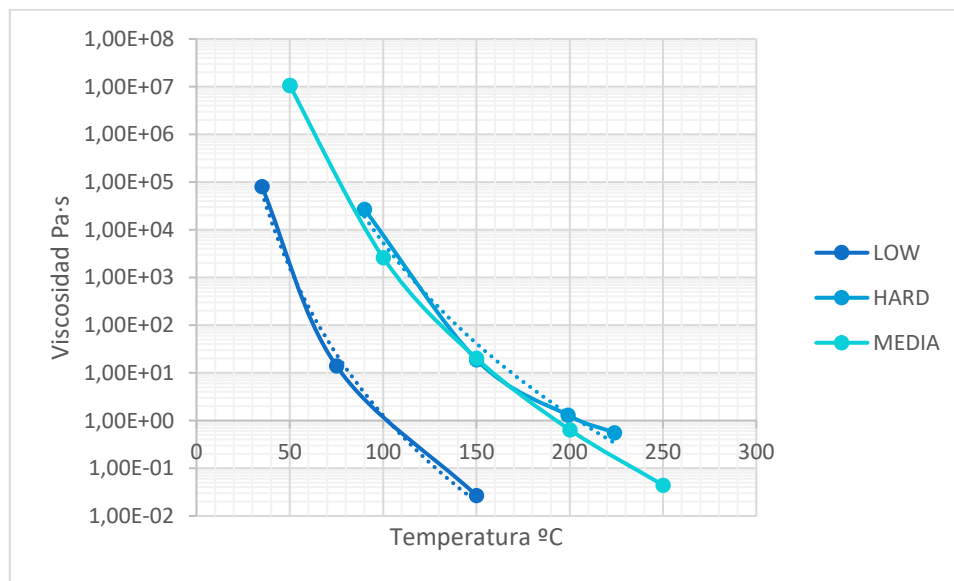


Figura 17: Relación Viscosidad - Temperatura

La expresión empírica que deriva de estos gráficos permitirá realizar distintas simulaciones en función de la temperatura de la brea.

$$\mu(T) = 2 \cdot 10^{27} T^{-11.99}$$

Donde:

T: es la temperatura expresada en grados centígrados

μ : es la viscosidad en Pa·s

Los datos calculados mediante la expresión anterior dan lugar a la siguiente tabla:

Temperatura °C	Viscosidad Pa·s
50	$1,1 \cdot 10^7$
100	$2,6 \cdot 10^3$
150	20,2
200	0,64
250	0,04

Tabla 3: Datos de viscosidad

Para que el lector se haga una idea de los valores representados,

- Brea a 25 °C presenta una viscosidad un billón de veces superior al agua a temperatura ambiente.
- Brea a 100 °C presenta una viscosidad cercana a la de la miel a 25°C

En la simulación se utilizará el valor de viscosidad alta (0,64 Pa·s) y viscosidad baja ($2,6 \cdot 10^3$ Pa·s)

GEOMETRIA

La morfología es uno de los aspectos más relevantes en este problema. Sin embargo, no hay información al respecto acerca de la forma ni la posición que adopto el material en sus últimos instantes antes de verterse en el mar.

Para establecer la geometría inicial se plantearán distintas morfologías sencillas y básicas. Es conveniente esclarecer que, ante la falta de esta información, es preferible contemplar varios casos con distintas geometrías básicas que permitan hallar unas primeras conclusiones para posteriormente modificar los parámetros y conseguir recalculas con morfologías distintas. Se considera un error establecer una geometría compleja sin tener una justificación bibliográfica de esta, ya que el error que se comete puede ser el mismo que con geometrías básicas.

De esta manera se planearán varios casos con geometrías distintas para poder observar el comportamiento según la forma inicial.

Capítulo 4: Formulación del modelo

A continuación, se detallan las primeras geometrías con las que se ejecutara la simulación:

Geometría A:

La geometría que se presenta a continuación consiste en un paralelepípedo, que descansa sobre el plano del suelo. Un volumen aproximado al del hallazgo.

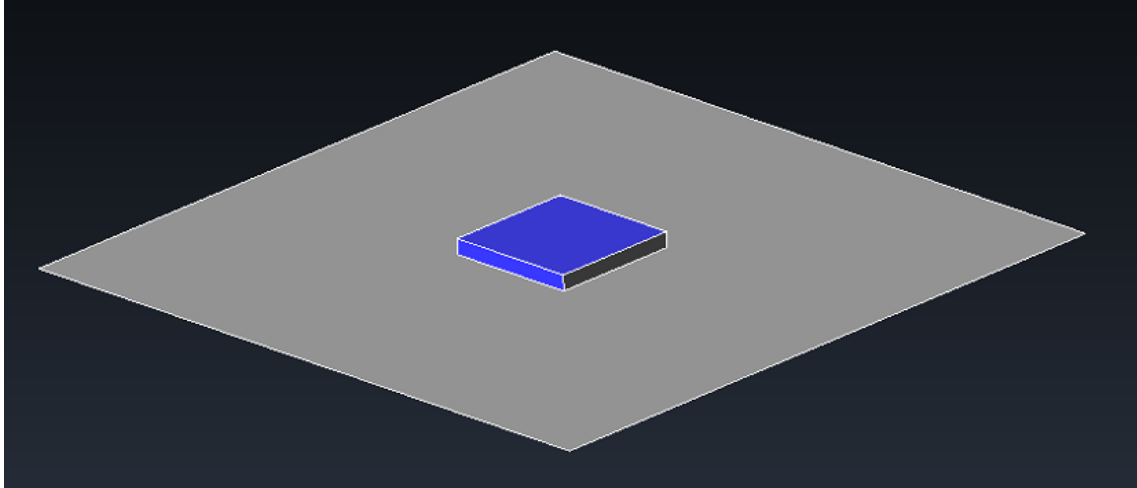


Figura 18: Geometría A. Lamina de brea

Geometría B:

La segunda geometría planteada es una esfera tangente al suelo con la que se pretende observar el comportamiento de un bloque compacto.

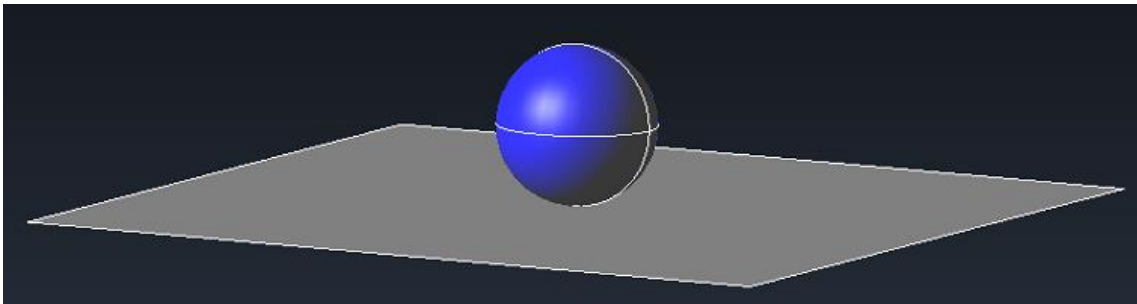


Figura 19: Geometría B. Esfera

Geometría C:

Esta geometría está formada por cilindro esbelto, perpendicular al plano XY. Esta morfología pretende simular la acumulación de material de forma continua y constante.

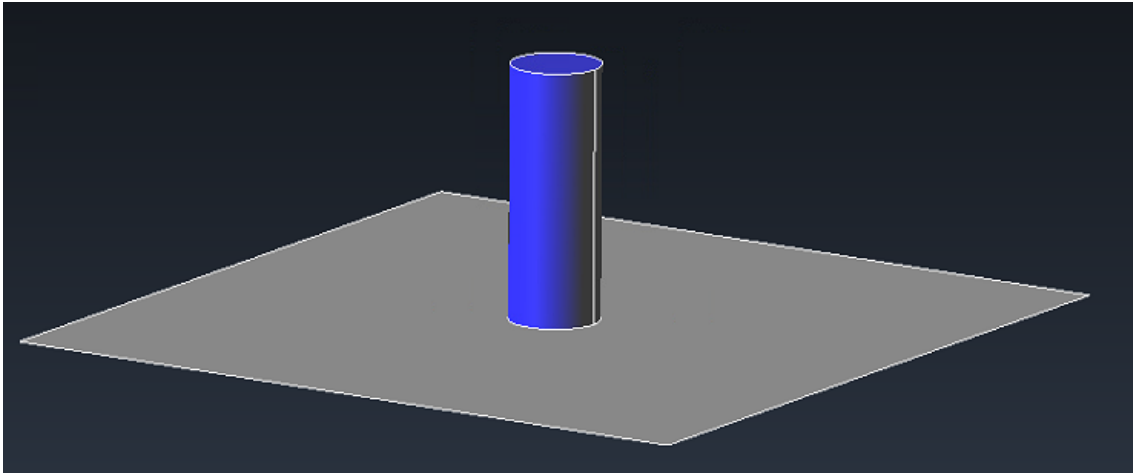


Figura 20: Geometría C. Cilindro

Geometría D:

Geometría que consiste en un cono esbelto, la finalidad es parecida al caso anterior, pero en este caso la acumulación de brea no se producirá de forma constante sino ira decreciendo de mayor a menor acumulación.

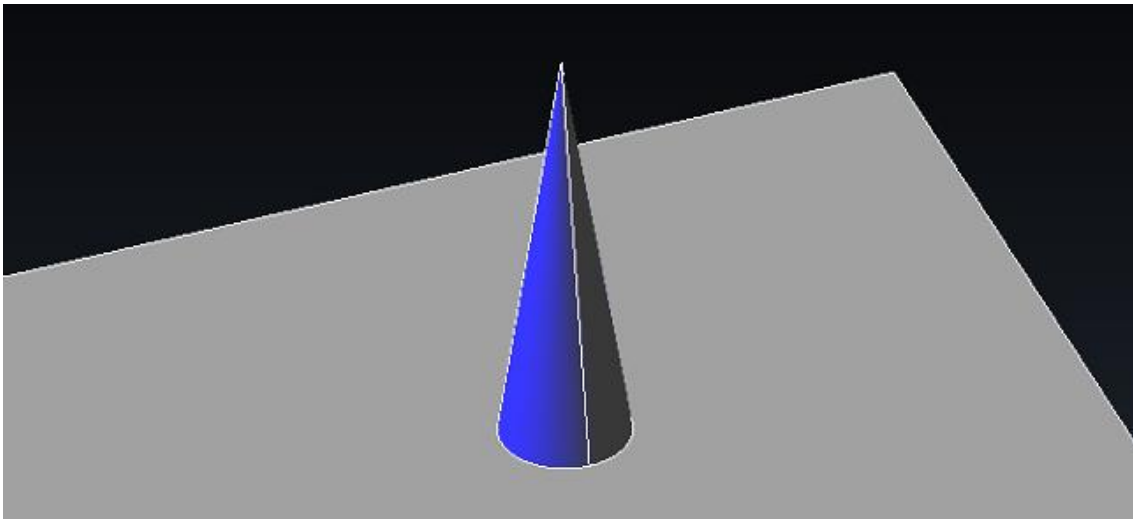


Figura 21: Geometría D. Cónica

CAPÍTULO 5: SIMULACIÓN

METODOLOGÍA Y DIAGRAMAS DE TRABAJO

En las siguientes líneas se expondrá cual es la metodología que se seguirá a la hora de realizar la simulación y su posterior validación. El método o el diagrama de trabajo (Figura 13) que se seguirá en los siguientes apartados es frecuentemente utilizado en simulaciones o en la elaboración de hipótesis.

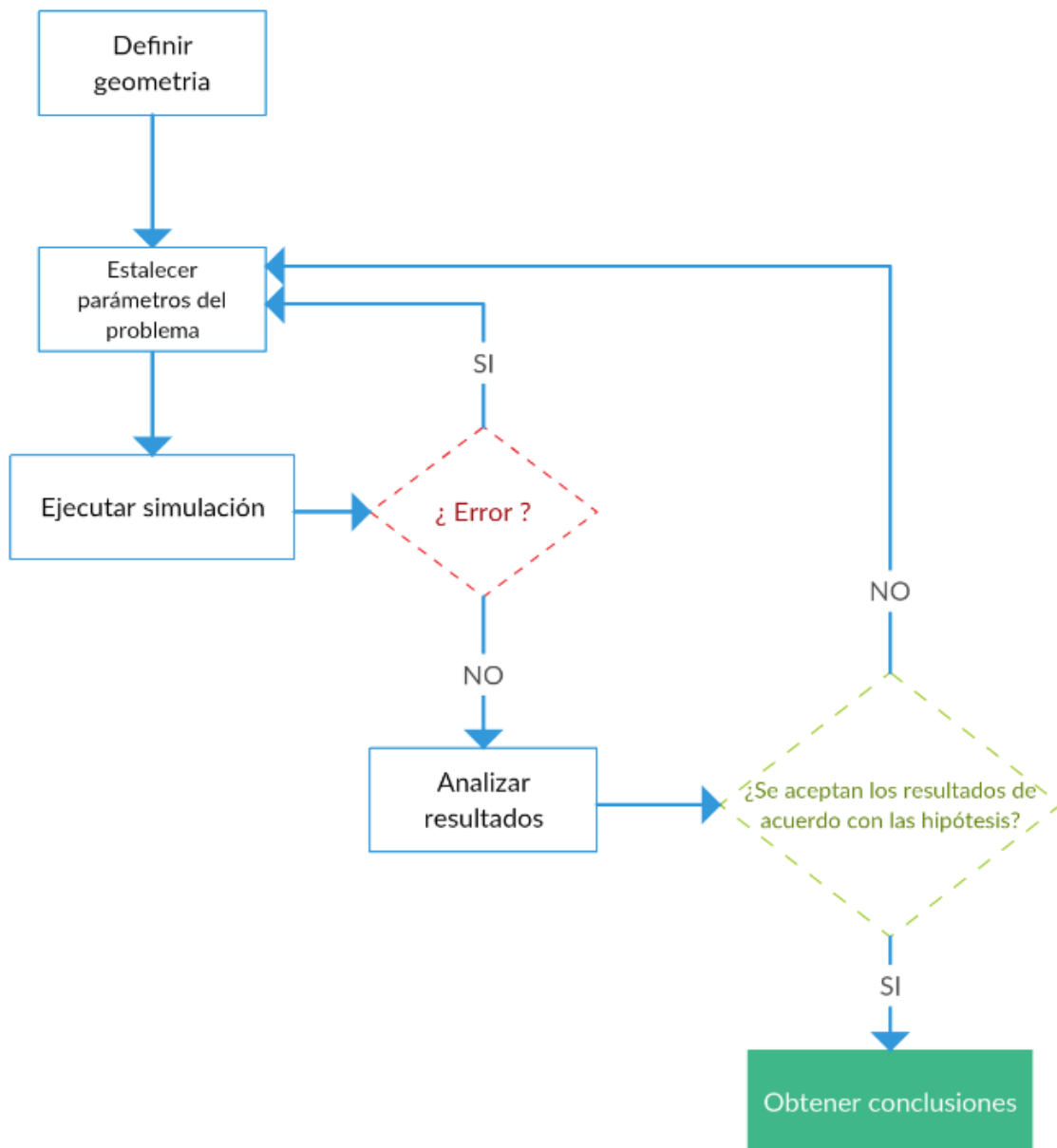


Figura 22: Diagrama de flujo - Metodología

DESCRIPCIÓN DE LOS PROGRAMAS UTILIZADOS

Para resolver el problema se utilizará mayormente GiD y los códigos Kratos y Python los siguientes programas:

- GiD: Desarrollado por CIMNE es un pre/post-procesador universal, flexible y de fácil uso en simulaciones en el campo de la ciencia i la ingeniería. Los principales puntos a destacar de este programa son:
 - Universal: GiD engloba toda la información necesaria para el análisis de cualquier problema donde se utilicen métodos numéricos. Mecánica de sólidos y estructural, fluodinàmica, transferencia de calor son algunos de los muchos tipos de problemas que se pueden abordar con este software.
 - Versátil: GiD se acopla fácilmente a cualquier código. Además, se puede personalizar el formato de entrada/salida de los datos y archivos.
 - Uso: Su uso es fácil y efectivo debido a que es un programa que se adapta al usuario para facilitar la entrada de datos y ver los resultados en el menor tiempo posible. [6]
- Kratos: Es una plataforma que permite la resolución de problemas de ingeniería mediante el uso de aplicaciones implementadas para cada caso. La interfaz de esta herramienta es flexible, lo que permite al usuario una eficiencia mayor a la hora de resolver determinados problemas.

Las principales características de Kratos son:

- Abierto y gratuito: Kratos está disponible a cualquier usuario sin ninguna restricción y mantiene la filosofía de compartir el conocimiento para poder mejorar la plataforma.
- Basado en FEM: Uno de los mejores métodos para resolver ecuaciones en derivadas parciales, comúnmente utilizadas en la resolución de problemas de ciencias aplicadas e ingeniería.
- Multifísico: Combina distintos tipos de análisis (térmico, fluido dinámico, estructural...) en una sola interfaz. [7]

La arquitectura de los códigos, escrita por expertos en FEM y altos conocimientos físico-matemáticos, tratan de resolver problemas mediante el uso de métodos numéricos. Kratos, también es usado por ingenieros, especialmente el uso de aplicaciones programadas específicamente para resolver problemas sin la necesidad de tener conocimientos de programación y sin tener la necesidad de desarrollar del código que hay detrás de cada problema.

El lenguaje del scryp es Python, un lenguaje de programación caracterizado por una sintaxis elegante y dinámica que lo convierte en un lenguaje ideal para el desarrollo de aplicaciones en varias plataformas. [8]

El entorno en que normalmente se trabaja en CIMNE es GNU/Linux. También conocido como Linux es un sistema operativo libre, disponible para todos los usuarios y en que cada uno de ellos puede aportar mejoras y participar con sus aportaciones.

Para hacernos una idea Linux tiene una cuota de mercado en servidores superior al 70 % y si hablamos de supercomputadores el porcentaje aún es mayor, dejando a Windows y MacOS prácticamente en el olvido, contrariamente de los que nos encontramos cotidianamente en los ordenadores personales.

La primera opción que se planteó era realizar la simulación con el ordenador personal propio que presenta las siguientes características técnicas:

- HP Compaq (Año 2009)
- Sistema: 32 bits
- Edición Windows: Windows 7 Ultimate
- Procesador: Pentium Dual-Core 2.00 GHz
- Memoria RAM: 4,00 GB

Estas características no son óptimas para poder realizar la simulación que se pretendía hacer. Como se ha comentado antes, el entorno habitual de trabajo es Linux. No obstante, por parte de CIMNE se dio la opción de trabajar en Windows. La compilación de Kratos en Windows requiere de conocimientos de programación que el estudiante no ha trabajado durante la carrera, pero, esta tarea sería realizada por especialistas.

De todas formas, la problemática de hacer este paso en un sistema operativo de 32 bits, impulso por parte de los técnicos la solución de utilizar de forma remota un ordenador preparado adecuadamente para este fin. Con esta metodología se ahorra tiempo en tareas que no son estrictamente necesarias.

El software utilizado para el control remoto es TeamViewer, un programa gratuito y disponible para todos los sistemas operativos.

Las características del ordenador que se utilizara para ejecutar la simulación son:

- Sistema: 64 bits
- Sistema operativo: Linux (Ubuntu 16.04 LTS)
- Procesador: Intel Core 2 Quad 2,33GHz x 4
- Memoria RAM: 3,90 GB

PARAMETROS DE LOS ENSAYOS

Nº ENSAYO	Geometría	Hundimiento	Viscosidad
1	A	NO	Media
2			Alta
3		SI	Media
4			Alta
5	B	NO	Media
6			Alta
7		SI	Media
8			Alta
9	C	NO	Media
10			Alta
11		SI	Media
12			Alta
13	D	NO	Media
14			Alta
15		SI	Media
16			Alta

Tabla 4: Ensayos

METODOLOGIA

En este apartado se exponen las fases por las que se irán pasando a lo largo de todo el proceso de simulación.

La simulación se puede dividir en 3 fases claramente diferenciadas entre sí.

- Pre-proceso
- Cálculo
- Post-Proceso

En la fase inicial llamada pre-proceso se importa la geometría del problema en GiD, al tratarse de figuras simples, el propio programa dispone de suficientes herramientas para su definición. Pero hay que remarcar que se pueden importar geometrías de programas CAD.

El siguiente paso es elegir el *problem type* que se utilizará, ya que GiD es la interfaz de visualización, pero dependiendo de problema que se quiera resolver, existen infinidad de códigos específicos según la casuística de cada planteamiento. Relacionado con el *problem type* se especifican las condiciones de contorno tales como las características de los materiales involucrados, restricciones de desplazamientos, coeficientes propios de cada material etc... En esta tesina el equipo de CIMNE ha facilitado el código “fluid_ulf_new”, capaz de calcular el comportamiento de fluidos altamente viscosos. El desarrollo del código no es objeto de esta tesina por eso no se harán comentarios acerca de este, ni se detallarán aspectos más propios de programación de métodos numéricos en ningún capítulo.

El siguiente paso antes del cálculo, es la configuración de la malla. La malla es el elemento que va a permitir discretizar la geometría para poder realizar los cálculos. El tamaño de la malla es fundamental para conseguir resultados ajustados a la realidad. No obstante, a medida que reducimos el tamaño para mejorar los resultados, el tiempo de cálculo aumenta significativamente. Por lo tanto, hay que encontrar la relación tamaño/resultados que mejor se adapte a nuestras necesidades.

Una vez se ejecuta el cálculo y no se dan errores de convergencia, se van creando multitud de archivos en la carpeta de destino. La gran mayoría son los distintos pasos (steps) que se utilizarán en el pos procesado para visualizar los resultados. Estos archivos binarios se reconocen fácilmente por su nombre acabado en “.post.bin”.

GEOMETRIA DEL PROBLEMA

Una vez se ha propuesto la metodología que se va a seguir para la simulación, en el siguiente apartado se detallarán los pasos que se han efectuado para definir la geometría con la que se trabajará.

En primer lugar, se propone un caso muy simplificado a modo de aprendizaje y como primera toma de contacto con el software GiD. También servirá para poder iniciar un primer procesado de forma rápida y ver los posibles problemas que se originan. A medida que se avance en esta etapa se irán proponiendo diferentes hipótesis o casos para poder extraer conclusiones que sirvan para mejorar el replanteamiento de esta geometría.

GEOMETRIA A

En esta primera geometría se detallarán los pasos que se han realizado en GiD, de este modo, las siguientes líneas pueden servir en un futuro como guía para tesinas relacionadas con este software.

Capítulo 5: Simulación

El modelo consta de una cuadrícula que representa el lecho marino, formada por 9 cuadrados con unas dimensiones de 3x3 m. En la parte central se observa un prisma que representa la masa de brea, las dimensiones del cual son 3x3x0,2 m.

La primera interfaz que nos encontramos resulta familiar a otros programas de dibujo donde predomina un fondo blanco con sus respectivos ejes XYZ donde se dibuja el modelo. En los laterales se encuentran multitud de iconos que se utilizan para añadir elementos que se comentarán a continuación. En la siguiente imagen se puede observar la interfaz comentada.

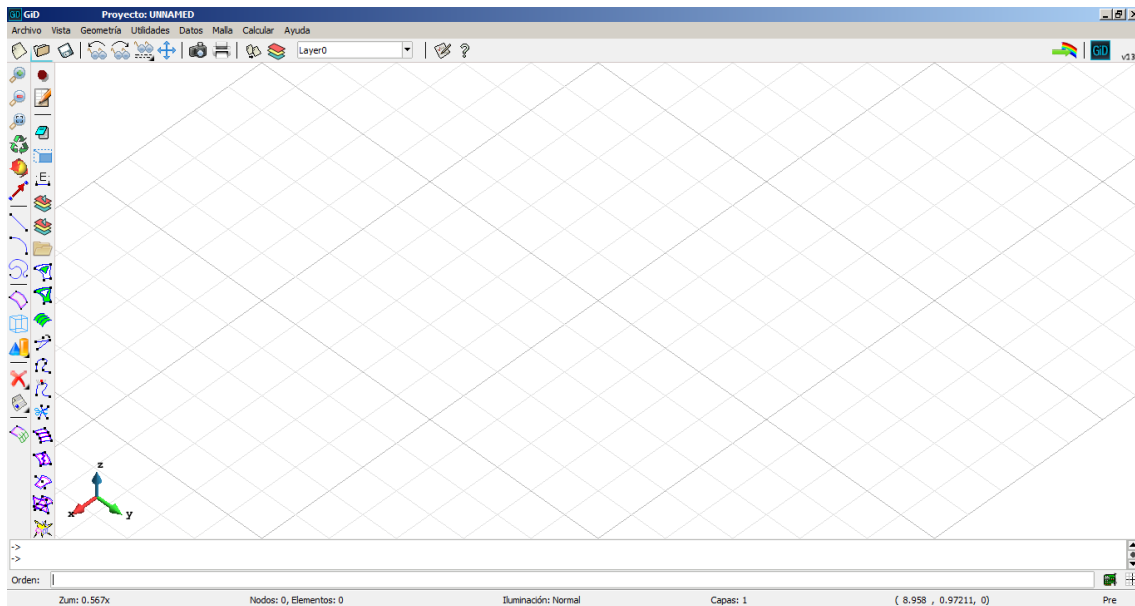


Figura 23: Interfaz

Los principales elementos que se verán en esta fase son:

- Punto: Es el elemento más básico, permite definir elementos más complejos. Se visualiza como un cuadrado de pequeñas dimensiones de color negro.
- Línea: Unión entre dos puntos, representadas en color azul oscuro.
- Superficie: Un conjunto de líneas cerradas forman un polígono con una estructura en alambre. Si se quiere especificar que el polígono forma una superficie hay que utilizar este comando. Las superficies se verán de color magenta y estarán a una distancia equidistante de las líneas que la forman.
- Volumen: Es la última entidad y la más compleja ya que necesita los 3 elementos anteriores para poder formarse. Se distingue de los otros elementos por su color cian y se ubica a modo de núcleo interno de la figura creada.

En la siguiente imagen (Figura 24) figura que representa un cubo se pueden distinguir los elementos mencionados: puntos, líneas (azul marino), superficie (magenta), volumen (cian).

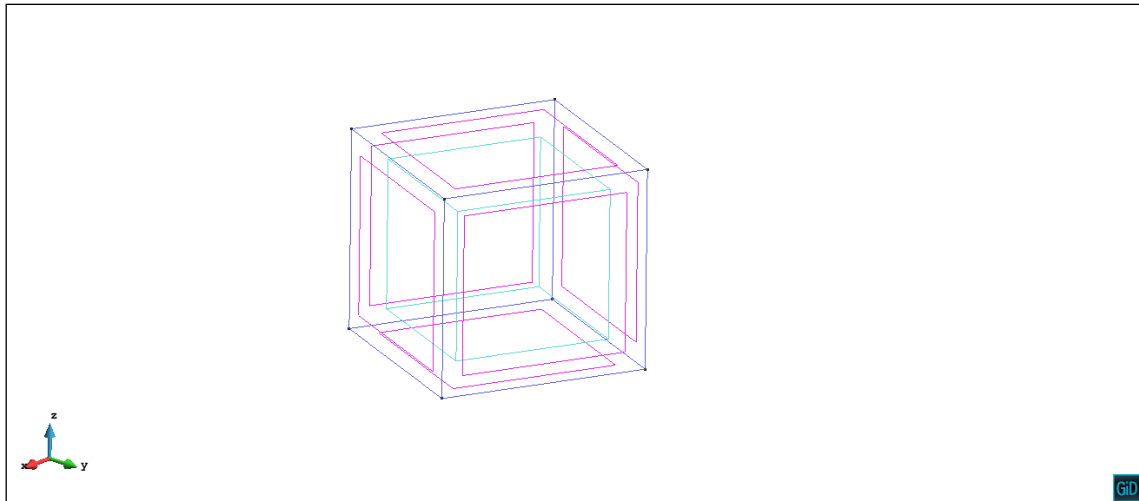


Figura 24: Esquema brea

A continuación, se modelará la primera geometría propuesta, explicando cada paso.

En primer lugar, se dibujarán los 4 puntos que forman la cuadrícula mencionada. Para ello nos situamos en el menú Geometría > Crear > Punto, y designamos sus coordenadas en la barra “orden”.

Seguidamente se dibujará el contorno de la cuadrícula utilizando el icono “línea”, que automáticamente creará la superficie. En la designación de puntos para crear elementos se requiere precisión ya que el cursor se ha de situar justo encima del punto. Para evitar este hecho se recomienda fijar la posición de unir con el comando (ctrl +a), esto aumentará la precisión y ahorrará tiempo a largo plazo.

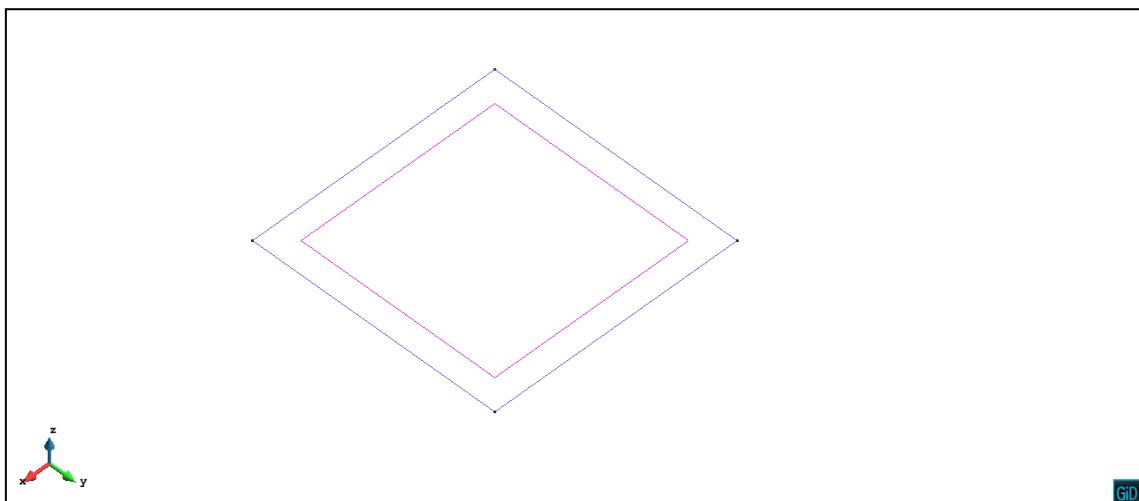


Figura 25: Contorno - Suelo

Una vez se ha dibujado la cuadrícula se dividirá en 3 partes iguales tanto horizontalmente como verticalmente.

Capítulo 5: Simulación

El siguiente paso es crear la masa de brea. Se puede hacer de múltiples formas, pero la más sencilla y rápida es extruir el cuadrado central.

Para realizar esta operación hay que utilizar el menú Utilidades > Copiar. En la ventana que aparece hay seleccionar los siguientes ítems:

- Tipo de entidades: Superficies
- Transformación: Traslación
- Extruir: Superficies

En el apartado “Primer punto” añadimos cualquiera de los puntos que forman la cuadrícula que queremos copiar. En el “segundo punto” se indican las coordenadas donde se trasladará el nuevo punto.

A continuación, apretamos el botón Seleccionar y designar mediante el cursor, las entidades que se quieren copiar, en nuestro caso la superficie. Al terminar observaremos que se ha generado un prisma de 6 caras con sus respectivas superficies en cada una de ellas.

Finalmente se crea el volumen mediante el icono (...) o en el menú Geometría > Crear > Volumen > Por contorno. Donde se seleccionarán las superficies que generan el volumen.

En la siguiente figura se observa el resultado final:

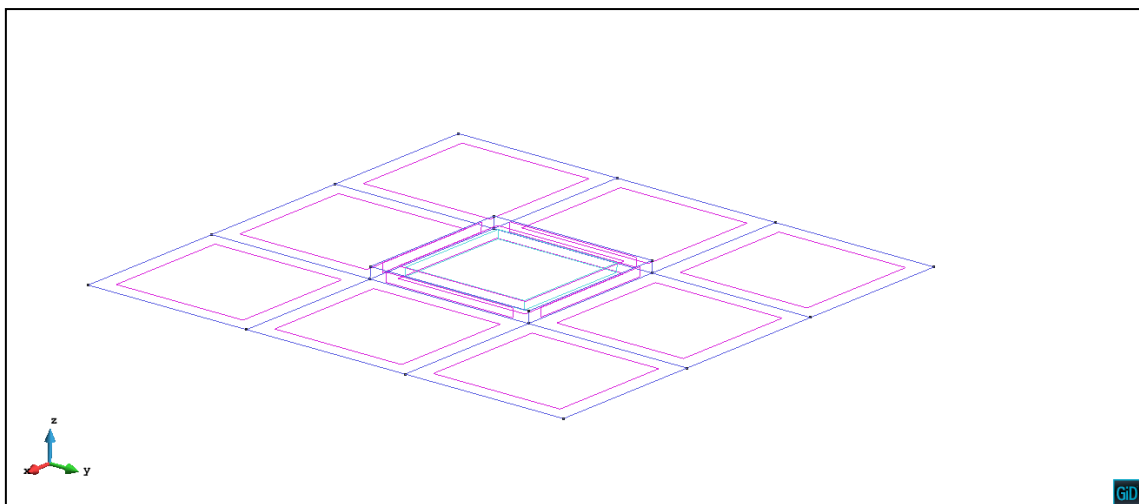


Figura 26: Geometría A

En cuanto a los parámetros que se han introducido en el menú del problema type “UPL FLUID NEW” son los siguientes:

	Fondo marino	Brea	
	Superficies	Superficies	Volumen
DISPLACEMENT	X	X	
IS STRUCTURE	X	X	
IS BOUNDARY	X	X	
UpdatedLangrangianFluid3D			X

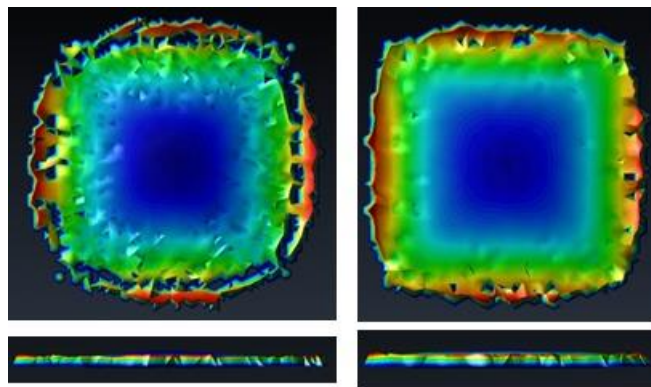
Tabla 5: Entidades

ANÁLISIS RESULTADOS

Los resultados que se han obtenido en las distintas simulaciones se presentan en este apartado donde se examinará cada ensayo y se deducirán conclusiones que posteriormente se recopilarán en el siguiente capítulo.

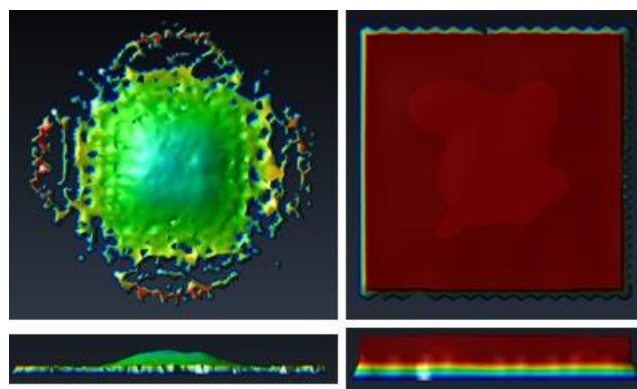
La estructura de presentación se repetirá en cada ensayo. Se nombrarán los ensayos de forma genérica como EX donde X es el número de ensayo. Cada pareja de ensayos tiene la misma geometría y la viscosidad se ordena de mayor a menor. Ejemplo: E1 es más viscoso que E2. De cada ensayo se escribirá un pequeño comentario para comparar resultados y extraer datos relevantes.

Ensayo 1 -2



En E1, la geometría inicial no se vislumbra con tanta facilidad como en E2 y las hendiduras son mucho más visibles e incluso se observa que hay zonas perimetrales que empiezan a separarse del conjunto. Estas separaciones ocasionan una pérdida de volumen respecto al estado inicial. En el E2 se observa redondeo del perímetro, pero aún conserva la estructura inicial debido a que el valor de la viscosidad es elevado. Hay que destacar que se observan pequeñas hendiduras en la parte más alejada del centro.

Ensayo 3-4

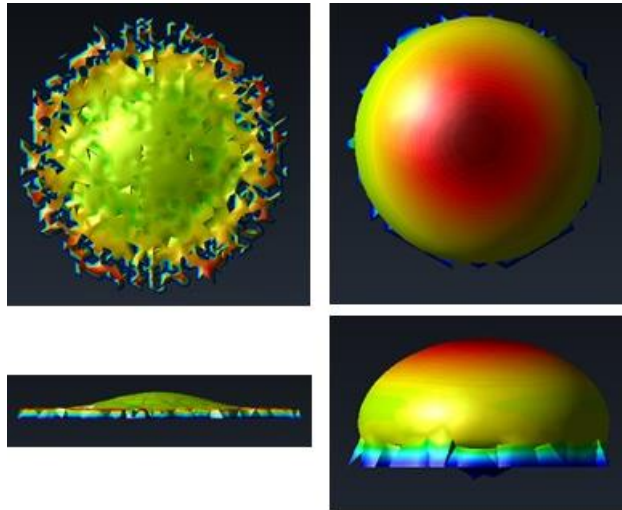


En estos ensayos se empieza a ver qué repercusión tiene el hundimiento de la brea en la morfología final. En E4 se presenta el primer resultado que genera dudas ya que el hundimiento no ha ocasionado cambios prácticamente, el único detalle destacable es el

Capítulo 5: Simulación

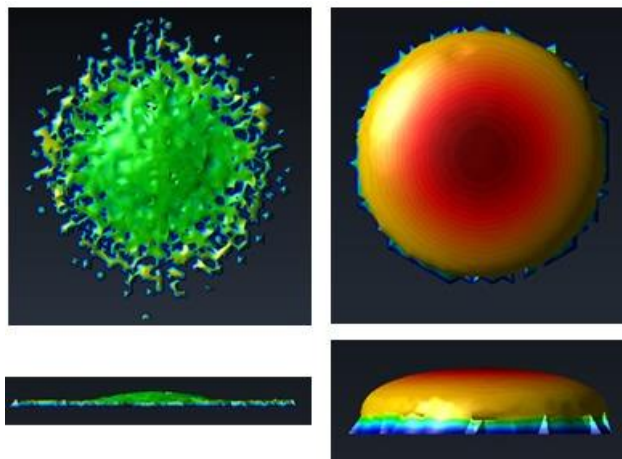
terraplén ínfimo que se forma en contacto con el suelo. En E3 encontramos elementos en común como las hendiduras, en este caso repartidas en toda la superficie. También se observa que se forma un montículo en el centro y que la pérdida de volumen es significativa, especialmente en dos direcciones perpendiculares entre sí.

Ensayo 5-6



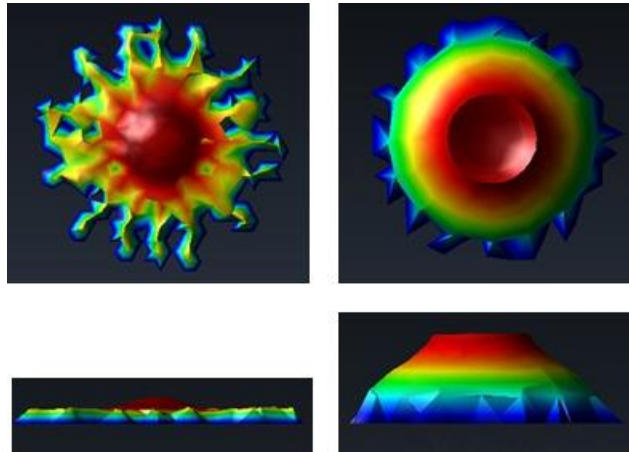
Los ensayos realizados con la geometría esférica revelan similitudes, con la geometría anterior pero estos resultados se aproximan más a la realidad. En E5 se observa la formación de un montículo central y una expansión perimetral repartida de forma homogénea, hecho que no se producía en E1 ni E3. Con viscosidad alta, la brea no se extiende con tanta facilidad como se aprecia en E6.

Ensayo 7-8



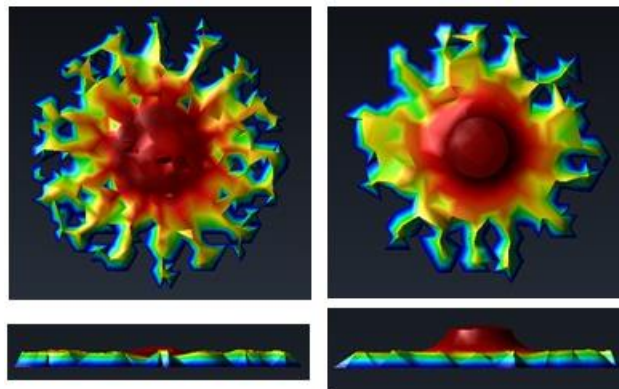
En el caso de hundir la brea los resultados no difieren tanto respecto a los ensayos E5-E6, se observan las mismas similitudes, pero disminuye la altura del montículo y aumenta la superficie final.

Ensayo 9-10



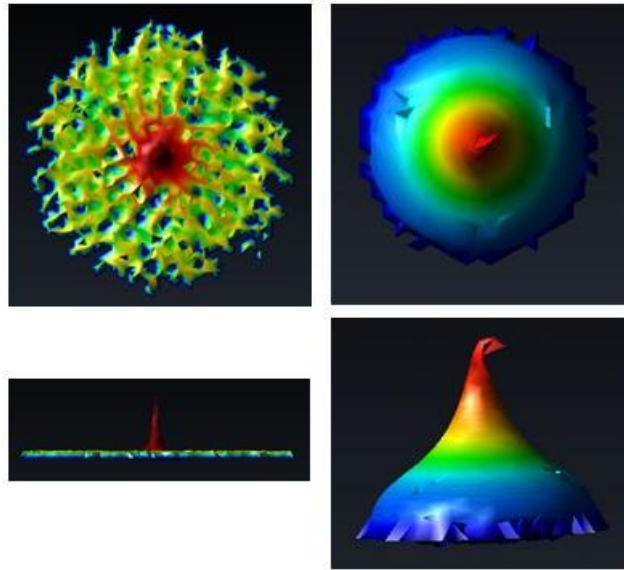
El comportamiento que se visualiza en estos resultados es descartable, principalmente por la vista en planta, ya que la formación de las puntas perimetrales no se asemeja en absoluto con el caso real.

Ensayo 11-12



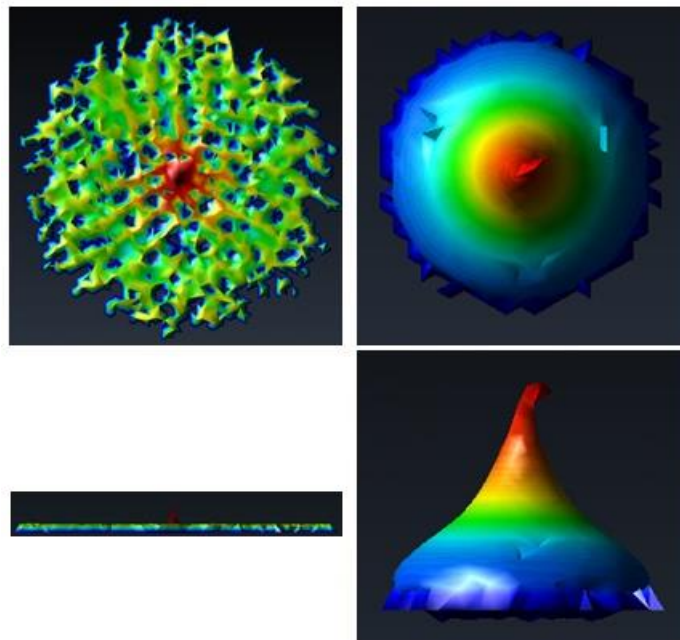
En estos dos ensayos, se utiliza el mismo argumento que en los anteriores (E9-E10), no obstante, hay que destacar que en E12 se observa una fusión entre las puntas perimetrales que morfológicamente es más apto a ser comparado con el objeto de estudio.

Ensayo 13-14



En los resultados que derivan de la geometría cónica, solo aportan que en caso de acumulación progresiva de brea en un mismo punto se forma una punta que con el tiempo se puede llegar a redondear dando lugar a un montículo parecido al comentado en el capítulo 2.

Ensayo 15-16



En inmersión de brea, hay que destacar que la simulación de esta geometría es la que da unos resultados más parecidos en cuanto a forma y superficie. El poco peso de la parte de arriba del cono conlleva a la no modificación de la morfología final.

VALIDACIÓN → “VALORACIÓN DEL MÉTODO”

En una simulación computacional la validación es fundamental para dar veracidad y establecer la fiabilidad del método empleado.

Para establecer un parámetro de coincidencia se utilizará la siguiente formula, consistente en una ratio entre relaciones de radio entre el hallazgo real y el simulado:

$$m = \frac{a_s/b_s}{a_r/a_r} \cdot 100$$

Donde:

a_s = radio inicial simulado

b_s = radio final simulado

a_r = radio inicial real (suposición)

a_r = radio final real (hallazgo)

Esta fórmula solo se aplica a los ensayos que han dado unos resultados, que según el criterio del autor son relevantes por su parecido con la realidad. Estos ensayos son los que corresponden a la geometría esférica. El radio inicial corresponde a una esfera de radio 0,75 metros, equivale a los 1,8 m³ y de radio real se aproximará a los 2,5 metros. Dando lugar a una relación de 0,42.

Ensayo	a_s	b_s	a_s/b_s	a_r/b_r	m
E5*	0,75	3,25	0,23	0,42	55%
E6	0,75	0,77	0,97	0,42	232%
E7*	0,75	4,2	0,18	0,42	43%
E8	0,75	1,12	0,54	0,42	159%

El ensayo que presenta mayor coincidencia es el E5 con un 55%, seguido del E7 (43%). Los dos ensayos se realizan a baja viscosidad.

CAPÍTULO 6: PLANTEAMIENTO PARA LA LOCALIZACIÓN DE PECIOS.

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de esta tesina ha sido aportar información acerca del hundimiento de un brulote, sin embargo, a lo largo de su redacción han ido surgiendo propuestas y reflexiones que, en la mayoría de casos se han declinado o se dejaron por escrito en el epígrafe de futuras líneas de investigación para poder retomarlas en próximos proyectos. En el siguiente capítulo se expondrá una idea que en ningún caso se había planteado inicialmente pero su desarrollo puede conllevar a importantes avances en este entorno de búsqueda submarina.

En los capítulos anteriores se ha analizado la hipótesis de que el hallazgo de la playa de Sitges se trate del Brulote de Marsay o por lo menos de la posibilidad de que se trate de los restos de un navío hundido. Este posible hallazgo ha desencadenado la búsqueda de los otros navíos involucrados en la batalla de Barcelona, considerados verdaderos tesoros arqueológicos. Si finalmente se encuentran los restos de estos dos buques, aumentarían las probabilidades de que la masa de brea sea del brulote, no obstante, será muy probable que esta masa estuviera involucrada o sea consecuencia directa de la batalla de Barcelona.

PLANTEAMIENTO DE BÚSQUEDA DE PECIOS

Este apartado plantea una idea para encontrar barcos hundidos con la premisa de que en su hundimiento estuvieran involucrados brulotes. Es curioso que solo se conozcan las localizaciones de 2 brulotes más, teniendo en cuenta que la cantidad de barcos hundidos es notoriamente superior. Uno de los principales motivos es la facilidad con la que se destruían estos navíos involucrados siempre en batallas. Otra opción es la fácil confusión que se puede llevar a cabo entre un montículo de brea y un conjunto de piedras.

Teniendo en cuenta que los hallazgos de embarcaciones pueden ser considerados un tesoro arqueológico de gran valor, este capítulo esboza lo que podría ser un método alternativo para la búsqueda de estos tesoros a partir de la búsqueda de los restos de brulotes.

La idea principal consiste en simular hundimientos y crear una serie de patrones y geometrías de brea. Sabiendo como tendrían que ser estos supuestos restos de naufragios se utilizarían uno de los varios métodos que existen hoy en día, para rastrear

Capítulo 6: Planteamiento para la localización de pecios

la localización de estas “manchas” en el suelo marino. Estas técnicas tienen un coste operativo claramente inferior a una prospección subacuática y presentan una eficiencia claramente mayor. A continuación, se exponen alguna de estas:

- Teledetección satelital: La teledetección es una tecnología reciente, aún en proceso de desarrollo, que usa imágenes de satélites para posteriormente procesarlas y obtener imágenes que a simple vista el ojo humano no puede detectar. Estas imágenes se obtienen utilizando los distintos espectros de la luz, mediante una serie de filtros se pueden obtener distintas imágenes según el objetivo que se busque. En la actualidad ya se están usando estas técnicas para la búsqueda de pecios.
- Uso de drones: La proliferación de técnicas basadas en *drones* proporcionan un acceso rápido y relativamente económico al espacio aéreo y permiten obtener datos de observación de la tierra caracterizados por su alta resolución espacial y su disponibilidad. La teledetección aplicada en estos aparatos sugiere una muy buena alternativa a las usadas actualmente.

DESARROLLO DE LA PROPUESTA

La propuesta que se plantea en este apartado implica medios externos, como los sistemas de teledetección mencionados anteriormente, es por este motivo, que se recomienda no usar este planteamiento hasta que no se mejoren manifiestamente los resultados obtenidos en esta tesina. Esta idea tiene como principal objetivo mejorar la eficiencia de búsqueda, pero es imprescindible conocer exactamente que hay que buscar y donde, de lo contrario aparecerían falsos positivos que lo único que generarían es una pérdida de los recursos utilizados.

Una muestra del potencial que se expone en este capítulo se puede observar comparando las dos imágenes pertenecientes a la misma zona. En la imagen de la derecha se han filtrado determinados espectros y se puede ver claramente el casco de un antiguo barco hundido.

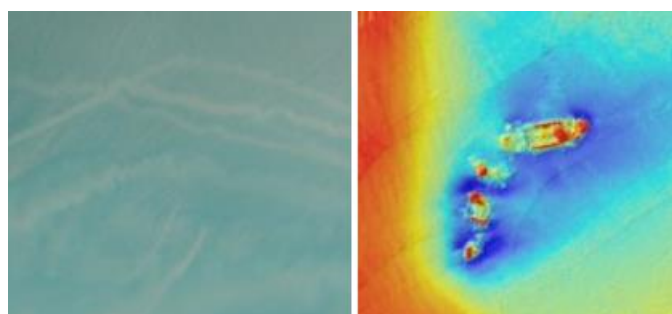


Figura 27: Comparativa teledetección

El desarrollo de esta idea queda pendiente para próximos trabajos o proyectos similares.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta tesina era aportar información acerca de un hallazgo que, según una primera hipótesis, parece ser el brulote de Marsay, involucrado en la batalla de Barcelona de 1642.

Una de las primeras conclusiones que se pueden extraer de la realización de este documento, es la dificultad que ha supuesto encontrar el enfoque adecuado para poder adaptar un **problema de gran complejidad** a uno de ámbito académico. La simplificación ha supuesto la omisión de variables y la fijación de la viscosidad y la geometría como variables de estudio. No obstante, se ha cumplido el objetivo de observar el comportamiento de la brea bajo distintos parámetros.

Los resultados permiten dar **mayor credibilidad a la hipótesis inicial** de que se trate del Brulote de Marsay o al menos de los restos de un brulote. Según los parámetros estudiados, esta tesina puede aportar que el supuesto navío, **embarrancó** y que la brea en ese momento se encontraba bajo unas condiciones de **viscosidad baja**, es decir, a temperatura alta y con una fluidez considerable.

Hay que destacar que la simulación planteada ha dado resultados positivos, tanto cualitativamente como cuantitativamente, dando una ratio **de similitud del 55%** aproximado.

Esta tesina también ha servido para encaminar un **nuevo planteamiento** para encontrar pecios basado en el problema inverso. Este planteamiento se basa en **sistemas de teledetección satelital**, drones... que rastrearían pecios basándose en resultados de una simulación. Mejorar la técnica y efectividad en la búsqueda de brulotes conlleva indudablemente a aumentar las probabilidades de encontrar auténticos **tesoros subacuáticos**.

Finalmente, el autor de esta tesina sostiene que se ha dado un paso importante para resolver el problema complejo, sobretodo en el planteamiento y en las **múltiples reflexiones** que han ido surgiendo a lo largo de este periodo. Estas cuestiones quedan reflejadas en el siguiente apartado.

FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

En proyectos futuros se tomarán las siguientes directrices:

1. Se considera de vital importancia la caracterización del material mediante la extracción de muestras, dado que en el presente proyecto no se han podido extraer.
2. La parametrización del entorno marino ha de ser prioritario, especialmente aspectos como el oleaje o las corrientes marinas.
3. Otro aspecto muy relevante es analizar el problema desde un punto de vista termodinámico ya que la relación viscosidad - temperatura es una de las más importantes en este desafío. El tiempo que tarda en enfriarse la brea es determinante, ya que de este aspecto depende la geometría final.
4. Priorizar e invertir más tiempo en la búsqueda de bibliografía o documentación que pueda aportar datos que eviten la enunciación de suposiciones.
5. El conjunto de todas las mejoras que se realicen ha de servir para mejorar la sensibilidad y acercar el método a la realidad.
6. Finalmente, hay que seguir trabajando en el método planteado en el capítulo 6 para implementar las mejoras de la simulación a una aplicación real.

CAPÍTULO 8: REFERENCIAS

- [1]. Izquierdo Tugas, Pere. (2016).Memòria de la revisió de la carta subaquàtica de Sitges.
- [2].Entrevista Radio Maricel (2014). Web: <http://www.radiomaricel.cat/2014/10/03/el-1642-sitges-va-viure-una-cruenta-batalla-naval/>
- [3].Museo Vasa(2017). Web: <https://www.vasamuseet.se/es>
- [4].Instituto de Historia y Cultura Naval. Tomo IV. Capítulo XVII: Batallas en la mar. Pdf: http://www.armada.mde.es/html/historiaarmada/tomo4/tomo_04_17.pdf
- [5].L. J. Wood; M. Downer. Wood & Downer - viscosity / temperature equations or tars (1965). Web: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/>.
- [6].GiD Home. Web: <https://www.gidhome.com/>
- [7].CIMNE, Kratos (2017).web: <http://www.cimne.com/kratos/>
- [8].Python (2017). web: <http://docs.python.org.ar/tutorial/3/real-index.html>
- [9].Teledetección satelital (2018). Web: <https://www.sciencedaily.com/releases/2016/03/160311142432.htm>

